



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

TITAN A JEHO SLITINY V LETECTVÍ

TITANIUM AND ITS ALLOYS IN AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Černota

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Jan Černota**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Titan a jeho slitiny v letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce bude shrnutí poznatků o materiálech na bázi titanu používaných v letectví a zhodnocení jejich výhod a nevýhod pro jednotlivé aplikace. V závěru práce by měl být formulován předpoklad vývoje použití těchto materiálů v leteckém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Shrnutí poznatků o materiálech na bázi titanu.
Popis struktury a vlastností vybraných slitin.
Zhodnocení jejich výhod a nevýhod pro letecké aplikace.
Predikce vývoje použití těchto materiálů v leteckém průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

FROES, F. H. Titanium: physical metallurgy, processing and applications. Ohio: ASM International, 2015, 978-1-68015-516-7.

SINGH, P., H. PUNGOTRA and N. S. KALSI. On the characteristic of titanium alloys for the aircraft applications, Materials today: proceedings, 2017, 4(8), pp. 8971-8982.

SEDLÁČEK, V. Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd. Praha, SNTL, 1979. 398 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou využití titanu a jeho slitin v letectví. Nejprve je zde pojednáno o titanu jako lehkém kovu, jeho historii, výskytu, využití, výrobě a vlastnostech. Dále pak o jeho slitinách, jejich dělení a charakteristice jednotlivých slitin s přihlédnutím k využitelnosti pro letecké aplikace. Hlavní část se zabývá využitím titanu a jeho slitin v leteckém průmyslu, kde jsou shrnuty požadavky na vlastnosti materiálů používaných v letectví, jak titan tyto vlastnosti splňuje a pro jaké komponenty bývá titan nejčastěji využíván. Práce také obsahuje predikci vývoje použití těchto materiálů v leteckém průmyslu.

Klíčová slova

Titan, slitiny titanu, letectví

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of the use of titanium and its alloys in aviation. First, it deals with titanium as a light metal, its history, occurrence, use, manufacture, and properties. Then about its alloys, their division, and the characteristics of individual alloys, considering their utility for aerospace applications. The main part deals with the use of titanium and its alloys in the aerospace industry, where the performance requirements of materials used in aviation are summarised, how titanium meets these properties and for which components titanium is most often used. The thesis also predicts the development of the use of these materials in the aerospace industry.

Keywords

Titanium, titanium alloys, aviation

Bibliografická citace

ČERNOTA, Jan. *Titan a jeho slitiny v letectví* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132482>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, PhD.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Titan a jeho slitiny v leectví vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady a vedení při zpracovávání této bakalářské práce a také Ing. Danielu Drdlíkovi, Ph.D. za výuku v semináři k bakalářské práci. Poděkování také patří mé rodině a blízkým za jejich trpělivost a podporu během mého studia.

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 9 |
| 2 | Cíle práce..... | 10 |
| 3 | Titan | 11 |
| 3.1 | Historie | 11 |
| 3.2 | Výskyt..... | 12 |
| 3.3 | Využití | 12 |
| 3.4 | Vlastnosti | 13 |
| 3.5 | Výroba kovového titanu | 14 |
| 3.5.1 | Výroba titanu redukcí chloridu titaničitého | 14 |
| 3.5.2 | Výroba titanu elektrolýzou..... | 16 |
| 4 | Slitiny titanu | 17 |
| 4.1 | Základní dělení titanových slitin | 18 |
| 4.2 | Slitiny typu α | 19 |
| 4.2.1 | TiAl5Sn2,5 | 20 |
| 4.2.2 | CP titan..... | 21 |
| 4.2.3 | TiAl3V2,5 | 21 |
| 4.2.4 | TiAl8Mo1V1 | 21 |
| 4.2.5 | TiAl6Sn2Zr4Mo2..... | 21 |
| 4.3 | Slitiny typu $\alpha+\beta$ | 22 |
| 4.3.1 | TiAl6V4 | 23 |
| 4.3.2 | TiAl7Mo4..... | 24 |
| 4.3.3 | TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2 + Si | 24 |
| 4.3.4 | TiAl6Sn2Zr4Mo6 a TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4..... | 24 |
| 4.4 | Slitiny typu β | 25 |
| 4.4.1 | TiAl3Mo8Cr11 a TiAl3V13Cr11..... | 25 |
| 4.4.2 | TiV10Fe2Al3 | 26 |
| 4.4.3 | TiV15Cr3Al3Sn3 | 26 |
| 4.4.4 | TiAl3V8Cr6Mo4Zr4 | 27 |
| 4.4.5 | TiMo15Al3Nb3Si0.2..... | 27 |
| 4.4.6 | TiV35Cr15 | 27 |
| 5 | Použití titanu a jeho slitin v letectví | 28 |
| 5.1 | Úvod | 28 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.2 | Požadavky na materiály v letectví | 29 |
| 5.3 | Titan jako kandidát pro aplikaci v letectví | 31 |
| 5.4 | Drak letadla..... | 33 |
| 5.5 | Plynové turbíny (motory) | 35 |
| 5.6 | Kosmonautika..... | 37 |
| 5.7 | Helikoptéry | 38 |
| 5.8 | Spojovací materiály a pružiny | 38 |
| 5.9 | Lockheed SR-71 „Blackbird“ | 39 |
| 6 | Diskuse: budoucnost titanu a jeho slitin v letectví | 41 |
| 7 | Závěr..... | 42 |
| 8 | Literatura | 43 |
| 9 | Seznam použitých zkratek a symbolů | 46 |
| 10 | Seznam obrázků | 48 |
| 11 | Seznam příloh..... | 49 |

1 Úvod

Již před mnoha tisíci lety lidé s obdivem sledovali ptactvo na nebi a snili o tom, že i oni se jednou vznesou z povrchu Země a budou se společně s nimi vznášet po obloze. Šili obleky, lepili křídla a konstruovali první stroje. Až v 18. století přišel první zvrát, kdy bratři Montgolfierové sestavili první horkovzdušný balón a člověk se konečně vznesl do výšin. Největší zlom však přišel 17. prosince roku 1903. Bratři Wrightové zkonstruovali první letadlo těžší než vzduch, jež tehdy pojmenovali *Wright Flyer*. Jejich dvanáctisekundový let do vzdálenosti 39 metrů tehdy přepsal dějiny a naplno odstartoval rozvoj jednoho z nejpokročilejších odvětví průmyslu – letectví.

Pojmem letectví bývá v dnešní době rozuměno nejen létání letadly a vrtulníky, ale také kosmonautika. Letectví je možno rozdělit do několika podskupin, z nichž nejznámější jsou letectví všeobecné, komerční, civilní a vojenské. To, že se jedná o vůbec nejbezpečnější způsob cestování a denně bývá přepraveno několik milionů osob naznačuje, že letecký průmysl prošel od svého vzniku obrovským technologickým pokrokem. Musely být navrhnuty vhodné konstrukce, propočítány miliony stran výpočtů mechaniky letu a hlavně – zvoleny správné materiály. Zde přichází na řadu titan. Materiál, jehož vlastnosti jsou pro letecké aplikace ideální. V letectví je využíván především ve formě slitin, o jejichž charakteristice a oblasti jejich využití bude v této práci blíže pojednáno. Vhodné by však bylo začít na samotném začátku, tedy titanem.

2 Cíle práce

- ⟨ Shrnutí poznatků o materiálech na bázi titanu.
- ⟨ Popis struktury a vlastností vybraných slitin.
- ⟨ Zhodnocení jejích výhod a nevýhod pro letecké aplikace.
- ⟨ Predikce vývoje použití těchto materiálů v leteckém průmyslu.

3 Titan

Titan (latinsky *titanium*) je výjimečný kov. Je čtvrtým nejrozšířenějším konstrukčním kovem v zemské kůře, má žádoucí kombinaci fyzikálních, chemických (odolnost vůči korozi, nízká bioreaktivita) a mechanických vlastností, které jej činí atraktivním pro letecké, lékařské a různé průmyslové aplikace [1,2]. V dřívějších dobách byl sice titan využíván výhradně v leteckém průmyslu a kosmonautice, díky jeho unikátním vlastnostem však dnes nalézá uplatnění i v průmyslu automobilovém, ve sportu a medicíně. Je to přechodný kov, avšak odlišný od jiných lehkých kovů jako je hliník či hořčík. Má vysokou rozpustnost pro řadu dalších prvků a za zvýšených teplot přímo reaguje s většinou nekovů (kyslík, dusík, vodík a uhlík). Výroba titanu má poměrně krátkou historii. Jeho průmyslová výroba naplno odstartovala až v 50. letech minulého století. Do roku 2011 celosvětová roční produkce titanové houby vzrostla na 186 000 tun. V současné době dosahuje roční produkce titanové rudy a rudních koncentrátů 10 milionů tun [3,4,5].

3.1 Historie

Titan byl objeven roku 1791 britským reverendem, mineralogem a chemikem Williamem Gregorem, který z koryta místní řeky izoloval tzv. černý písek (Obr. 1), minerál nyní známý jako ilmenit (FeTiO_3). Po odstranění železa magnetem a úpravou písku kyselinou chlorovodíkovou získal nečistý oxid nového prvku, jenž pojmenoval menakin, dle místa jeho naleziště. Nezávisle na něm pak o čtyři roky později německý chemik Martin Heinrich Klaproth úspěšně izoloval oxid neznámého prvku z minerálu rutil. Inspirován řeckou mytologií, dal prvku název titan.



Obr. 1: Černý písek, obsahující drobné části ilmenitu, rutilu a zirkonu [6]

Nicméně trvalo více než sto let, než titanový průmysl poznal svého duchovního otce. Byl jím lucemburský hutník Wilhelm Justin Kroll. V roce 1932 dokázal produkovat značné množství titanu kombinací TiCl_4 a vápníku. Na začátku druhé světové války odletěl do USA, kde prokázal, že titan lze komerčně extrahovat redukcí TiCl_4 záměnou redukčního činidla z vápníku na hořčík. Dodnes je tento způsob nejpoužívanější metodou výroby čistého titanu, která je nyní známá jako Krollův proces. Po konci druhé světové války začaly být slitiny na bázi titanu považovány za klíčový materiál pro výrobu leteckých motorů. V roce 1948 americká společnost DuPont jako první začala s komerční výrobou titanu a otevřela tak brány skutečnému potenciálu tohoto prvku.

V dnešní době je letecký průmysl stále největším spotřebitelem titanu a jeho slitin na světě, nicméně ostatní odvětví, jako architektura, medicína, energetický průmysl, námořní doprava a sport, nacházejí ve slitinách titanu stále větší využití [7].

3.2 Výskyt

Titan je devátým nejrozšířenějším prvkem zemské kůry s celkovou hustotou $4,51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (0,63 % zemské kůry) a sedmým nejrozšířenějším kovem [7]. Tento lehký kov má také tu čest být čtvrtým nejrozšířenějším konstrukčním kovem hned po hliníku, železe a hořčíku [8]. Naneštěstí, jen málokdy se dá nalézt ve vysokých koncentracích a nikdy se nenachází v čistém stavu. Také jeho obtížná výroba ho činí ekonomicky drahým kovem. Dokonce i dnes se titan vyrábí pouze po dávkách a neexistuje žádný kontinuální proces jeho výroby, jako je tomu u jiných konstrukčních kovů [7].

Nejekonomičtější rudou pro získání titanu je minerál rutil [3]. Rutil (Obr. 2) je preferovanou rudou zejména díky vysokému obsahu TiO_2 (97 %), což je mnohem více, než je tomu u ostatních minerálů, ku příkladu nejkvalitnější forma ilmenitu obsahuje „pouze“ 63 % TiO_2 . Největší naleziště rutilu se dají nalézt v Severní Americe, Africe, Indii, Brazílii a Austrálii. Z mnoha jiných minerálů obsahujících titan nejvíce vyčnívá ilmenit (Obr. 3), který je rozšířen po celém světě a jeho ruda je hlavním kandidátem pro budoucí výrobu titanu. Obrovská naleziště ilmenitu se nachází převážně v Kanadě a Spojených státech amerických [9]. Výhodou je levná těžba ilmenitu, neboť doly jsou většinou povrchové a ložiska se nacházejí těsně pod povrchem [10]. Ostatní materiály obsahující méně TiO_2 než rutil a ilmenit nejsou v současné době vhodné pro výrobu titanu, nýbrž zatím není známý žádný ekonomicky výhodný proces pro extrakci TiO_2 a následnou produkci čistého kovu. Za zmínku však stojí také další minerály obsahující oxid titaničitý, jako jsou například perovskit (CaTiO_3), titanit (CaTiSiO_5) a pyrofanit (MnTiO_3) [9].



Obr. 2 Rutil [10]



Obr. 3 Ilmenit [11]

3.3 Využití

V porovnání s železem a ocelí je využití titanu jako konstrukčního kovu stále ve svých počátcích. První komerční výroba titanu odstartovala v roce 1948, přičemž celková roční produkce toho roku činila pouhých 1800 kg. Do roku 1955 pak jeho produkce vyrostla přes 9000 kg. Na konci devadesátých let 20. století dosáhla přibližná celosvětová roční produkce titanového ingotu 130 tun. Nárůst výroby závisel především na vlastnostech kovu a také na vývoji jeho slitin.

Hlavní uplatnění nachází titan stále v oblastech letectví, jako jsou motory, draky letadel, rakety a kosmické lodě. Je to především díky malé hustotě kovu a vysokému poměru pevnosti ku hmotnosti při zvýšených teplotách. Námořnictvo pak začalo využívat titan díky jeho výjimečné odolnosti vůči korozi i ve slané vodě. Tohoto faktoru v současnosti využívají i elektrárny pro vystýlku chemických reaktorů.

Titan si našel své uplatnění také na poli medicíny v podobě různých implantátů, kostních náhrad a pro výrobu chirurgických nástrojů. Využíván bývá i v kardiostimulátorech a také dokonce pro léčbu různých nádorových onemocnění, kdy titan slouží jako zapouzdřovací materiál pro radioizotop jodu-125. Dále bývá využíván v ropných rafinériích, pro bělení papíru, nebo pro výrobu luxusních náramkových hodinek a části šperků [9].

3.4 Vlastnosti

Chemický prvek titan (Ti) je stříbřitě šedý kov čtvrté skupiny periodické tabulky. Je to lehký, vysoce pevný konstrukční kov s vysokou odolností proti korozi užívaný především ve formě slitin jako součástek vysokorychlostních letadel [12]. Čistý titan patří do skupiny kovů střední pevnosti. Jeho vlastnosti však značně závisí na čistotě, především na obsahu kyslíku, uhlíku, dusíku a železa. Jeho pevnost lze výrazně zvýšit tvářením za studena [13]. Dále je tvárný, má poloviční hustotu než železo a téměř dvakrát větší hustotu než hliník. Po úpravách může dosahovat vysokého lesku. Má velmi nízkou elektrickou a tepelnou vodivost, vysokou teplotu tání a je paramagnetický [12]. Titan je polymorfní a existuje ve dvou krystalických strukturách. Při teplotě 883 °C se hexagonální fáze α mění na kubickou fázi β prostorově centrovanou [13]. V přírodě se vyskytuje v pěti stabilních izotopech (titan-46 až titan-50).

Titan je také důležitý jako legující prvek u většiny kovů a některých nekovů. Některé z těchto slitin dosahují mnohem lepší pevnosti v tahu než titan samotný. Jak již bylo zmíněno, titan má vynikající odolnost proti korozi v různých prostředích v důsledku toho, že na svém povrchu tvoří stabilní a v podstatě inertní ochranný oxidační film (TiO_2). I při vystavení konstantnímu působení mořské vody nedochází ani po třech letech ke zdatelné korozi kovu. Titan se podobá ostatním přechodným kovům, jako je železo a nikl, svou tvrdostí a žáruvzdorností. Jeho kombinace vysoké pevnosti, nízké hustoty (je poměrně lehký ve srovnání s jinými kovy s podobnými mechanickými a tepelnými vlastnostmi) a vynikající odolností proti korozi ho činí ideální volbou pro využití v letectví. Za vysokých teplot však ve vzduchu reaguje s kyslíkem. V kapalném stavu je zase velmi reaktivní a redukuje všechny známé žáruvzdorné materiály [12]. Konkrétní hodnoty vlastností titanu jsou pak uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vybrané vlastnosti titanu [14]

| Vlastnosti titanu | |
|---|-----------------------|
| Protonové číslo | 22 |
| Relativní atomová hmotnost | 47,867 |
| Teplota tání [°C] | 1668 |
| Teplota varu [°C] | 3287 |
| Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] | 4,51 |
| Oxidační stavy | II, III, IV |
| Elektronová konfigurace | $[\text{Ar}]3d^24s^2$ |
| Tvrdość podle Mohse | 6,0 |
| Tvrdość podle Vickerse [MPa] | 970 |
| Tvrdość podle Brinella [MPa] | 716 |
| Modul pružnosti ve smyku [GPa] | 44 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 116 |

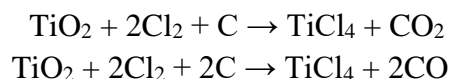
3.5 Výroba kovového titanu

Naše planeta obsahuje obrovská ložiska titanu. Na počátku 21. století byla celosvětová zásoba oxidu titaničitého odhadována na 650 miliard tun, a to především díky jeho výskytu ve většině minerálů, ve skalách, ale také v hlíně, rašelině i v uhlí. Nicméně, jak již bylo zmíněno, pro průmyslovou výrobu jsou užitečné zejména minerály ilmenit a rutil. Po vytěžení následují prvotní úpravy (čištění, obohacování), následně se především levnější ilmenit oddělí od železa užitím metalurgických procesů, čímž se struska obohatí do bodu, kdy lze dosáhnout koncentrace srovnatelné s rutilem. Jak ilmenit, tak rutil se redukuje na kovový titan pomocí rozšířeného Krollova procesu, o kterém bude pojednáno později [7].

Při výrobě kovového titanu se vyskytují mnohé problémy. Je to díky velké schopnosti titanu slučovat se za vyšších teplot s kyslíkem, dusíkem a dalšími prvky, což komplikuje izolaci titanu z jeho sloučenin. Při redukcí oxidu titaničitého uhlíkem vznikaly karbidy, popřípadě karbonitridy titanu nebo jimi silně znečištěný kov, který byl pro technickou praxi prakticky nevyužitelný, jelikož se běžnými způsoby rafinace nečistoty z titanu nedaly odstranit. Technická obec proto musela vypracovat nové pracovní postupy, aby bylo možno vyrobit dostatečně čistý kov. Ten lze získat redukcí oxidu titaničitého vápníkem, avšak tato metoda se průmyslově neuplatnila. Mnohem více pozornosti se dostalo metodě Hunterově (který už v roce 1910 dokázal vyrobit čistý titan redukcí chloridu titaničitého sodíkem), avšak ani tento způsob nenalezl uplatnění, neboť byl příliš nákladný [15]. V průběhu let se však objevilo několik úspěšných metod, které splňují kritéria pro průmyslovou výrobu. Tyto metody budou blíže popsány v následujících podkapitolách.

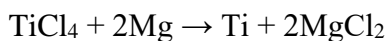
3.5.1 Výroba titanu redukcí chloridu titaničitého

Chlorid titaničitý se volně v přírodě nevyskytuje, proto je potřeba ho nejprve vyrobit. Výroba chloridu titaničitého probíhá vysokoteplotní reakcí rutilu či ilmenitové strusky s chlorem za přítomnosti redukčního činidla, obvykle uhlíku. Reakční schéma lze znázornit rovnicemi

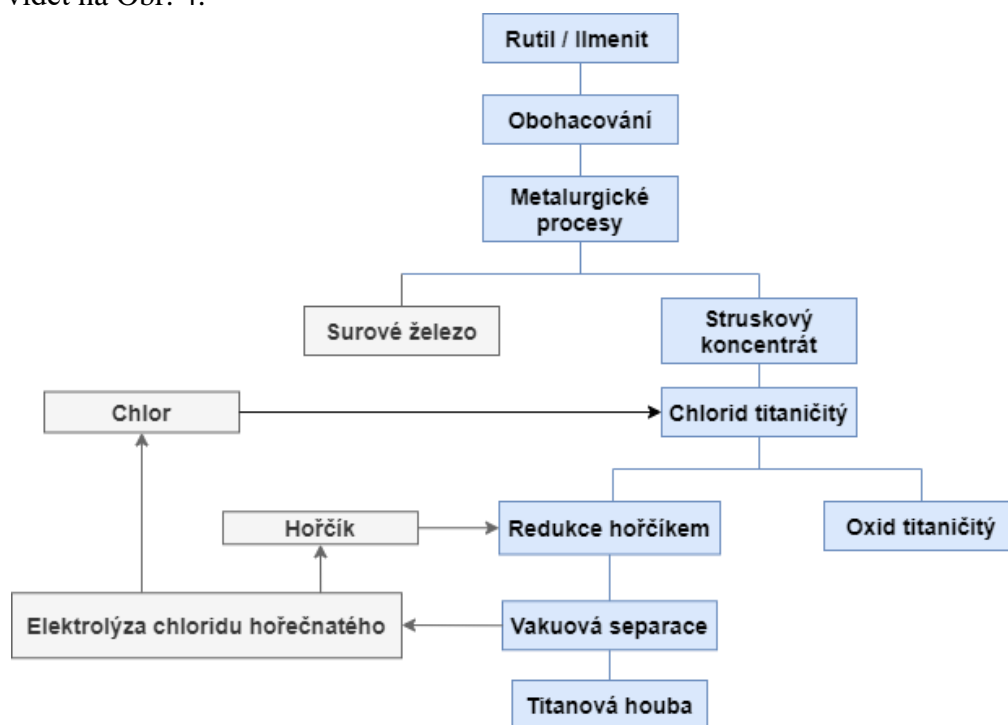


Rutil nebo struska se smíchá s práškovým uhlím, tato směs se briketuje a kalcinuje v redukční atmosféře za teploty 700 °C. Kalcinát se poté v šachtové elektrické peci chloruje plyným chlorem. Hlavním produktem chlorace je surový chlorid titaničitý, který se odvádí jako plyn z horní části pece a ostatních chloridů, případně přebytečného chloru, se zbavuje rafinací. Filtrací se odstraní chloridy železa a hliníku, frakcionovanou destilací chlorid křemičitý, redukcí měděným práškem či sirovodíkem a následnou destilací se konečně odstraňuje oxichlorid vanadu. Na 1 tunu vyrobeného chloridu titaničitého je zapotřebí 0,692 tuny strusky s průměrným obsahem 70 % TiO_2 , 1,1 tuny chloru a přibližně 3500 kWh energie [15].

Chlorid titaničitý lze redukovat na kovový titan buď hořčíkem, nebo sodíkem. Běžnější redukci hořčíkem vypracoval v letech 1937 až 1942 W. Kroll, podle něhož nese tento proces název Krollova metoda. Tato metoda je založena na pozvolném připouštění chloridu titaničitého do roztaveného hořčíku, tato reakce probíhá podle rovnice



Redukce musí být prováděna bez přístupu vzduchu, aby se předešlo znečištění titanu kyslíkem a dusíkem. Kvůli tomuto redukce probíhá ve vakuově těsné nádobě pod ochranou inertního plynu, obvykle argonu. Roztavený hořčík se nachází ve vnitřním železném kelímku, exotermická reakce probíhá při teplotě kolem 800 °C. Při redukci vzniká titan, který narůstá v kelímku na stěnách i nad hladinou roztaveného hořčíku v podobě takzvané titanové houby a postupně se hromadí vzhůru do středu kelímku. Vznikající tekutý chlorid hořečnatý se hromadí na spodku kelímku a prostupuje i titanovou houbou. Jelikož je jeho objem mnohem větší než objem titanové houby, je nutno ho během reakce odstraňovat. Po ukončené reakci titanová houba chladne v atmosféře inertního plynu. Chloridu hořečnatého lze opět využít pro elektrolýzu hořčíku a k získání chloru. Jeden cyklus trvá 12 až 18 hodin a vyrobí se při něm přibližně 200 až 1000 kg titanové houby, záleží na velikosti reaktoru. Jelikož je titanová houba prostoupena chloridem hořečnatým a nadbytečným hořčíkem, je nutné ihned po redukci houbu upravit. Chlorid hořečnatý a hořčík se oddělují nejčastěji vakuovou separací při 900 °C ve vakuové retortě s kondenzátorem ve zvláštní peci nebo přímo v redukčním zařízení. Tato separace trvá 10 až 48 hodin a po vychladnutí se houba vyseká z kelímku a drtí se na velikost 10 až 15 cm. Po separaci se titanová houba ukládá do uzavřených nádob, kde je chráněna před vlhkostí. Na výrobu 1 tuny je zapotřebí přibližně 5 tun chloridu titaničitého, 1 tona hořčíku a 30000 kWh energie [15]. Zjednodušené schéma kompletního procesu výroby titanové houby je možno vidět na Obr. 4.



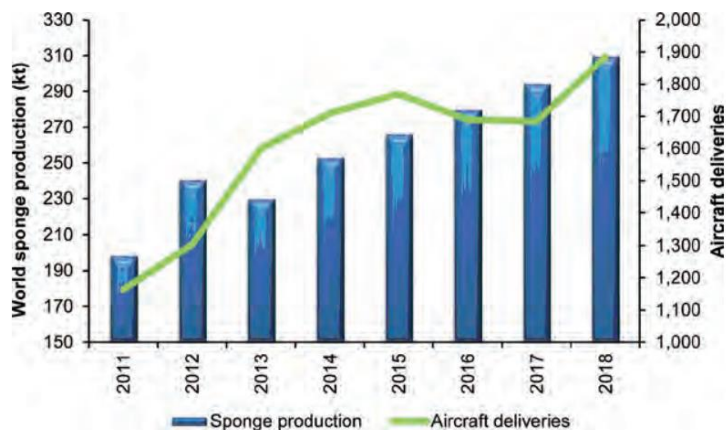
Obr. 4 Rozšířený Krollův proces pro výrobu titanové houby (přeloženo) [7]

Druhý způsob redukce chloridu titaničitého, tedy redukce sodíkem, se v podstatě podobá metodě Krollově, má však proti němu nevýhodu v tom, že sodík je nutno těsně před redukcí vakuově destilovat. Má však i jisté výhody, například redukce probíhá za nižších teplot a titan se nepřivaruje na stěny reakční nádoby, tudíž je usnadněno jeho vyjímání. Také hygroskopičnost vznikajícího chloridu sodného je menší než u chloridu hořečnatého, takže se surovou titanovou houbou lze manipulovat na vzduchu i před separací. Oba postupy mají však společnou nevýhodu, a tou je výroba po dávkách. Spojitý pochod komplikují velké potíže s plynulým odstraňováním titanu z reakčního prostoru [15].

3.5.2 Výroba titanu elektrolýzou

Vyrobít titan elektrolýzou bylo v minulosti problematické. Chemické vlastnosti titanu vylučují možnost elektrolýzy z vodných roztoků. Zkoušela se tedy příprava titanu elektrolýzou roztavených solí, kde výchozí látkou mohly být různé sloučeniny. Ihned se nabízela elektrolýza oxidu titaničitého, který se dá rozpustit ve fosfátových či boritanových lázních. Zde se však vyskytl problém odstranit oxid titaničitý z vyloučeného titanu. Pracovní teplota v lázních totiž byla mnohem nižší, než je bod tání titanu, tudíž se titan vylučoval ve velmi jemných částech, které znemožňovaly odstranění oxidu titaničitého mechanicky, ani chemicky.

Tyto problémy vyřešila až elektrolýza bezkyslíkatých solí. Ihned se osvědčil fluorotitaničitan draselný, který se rozpouští v roztavené směsi fluoridu sodného a draselného za teploty 850 °C. Dále je možnost elektrolýzy chloridu titaničitého ve dvoustupňovém elektrolýzérovi při teplotě 750 až 850 °C. Elektrolytem je zde roztavená lázeň chloridu stronťaného a sodného, do níž se přivádí chlorid titaničitý. Elektrolýzér obsahuje jednu speciální katodu z ocelového plechu a dvě grafitové anody. Vyroběný titan je duktilní a usazuje se na vnitřních stěnách katody v poměrně tlustých vrstvách. Z dalších možností výroby lze ještě zmínit elektrolýzu karbidu titanu, která má sice jisté ekonomické přednosti, nýbrž čistota titanu na katodě není tak vysoká. Výhodou výroby elektrolýzou je možnost dosáhnout velmi dobré jakosti titanu. Nicméně dodnes není žádný elektrolytický postup propracován tak, aby mohl soutěžit s redukční cestou. Elektrolýza se sice uplatňuje zejména ke zpracování odpadů polotovarů z titanu a jeho slitin, ale v budoucnu by rozvoj elektrolýzy mohl podstatně zlevnit výrobu titanu jako takového [15]. Závěrem této kapitoly by bylo vhodné ukázat, jak světová produkce titanové houby ovlivňuje dodávky letadel. Tato závislost je znázorněna na Obr. 5.

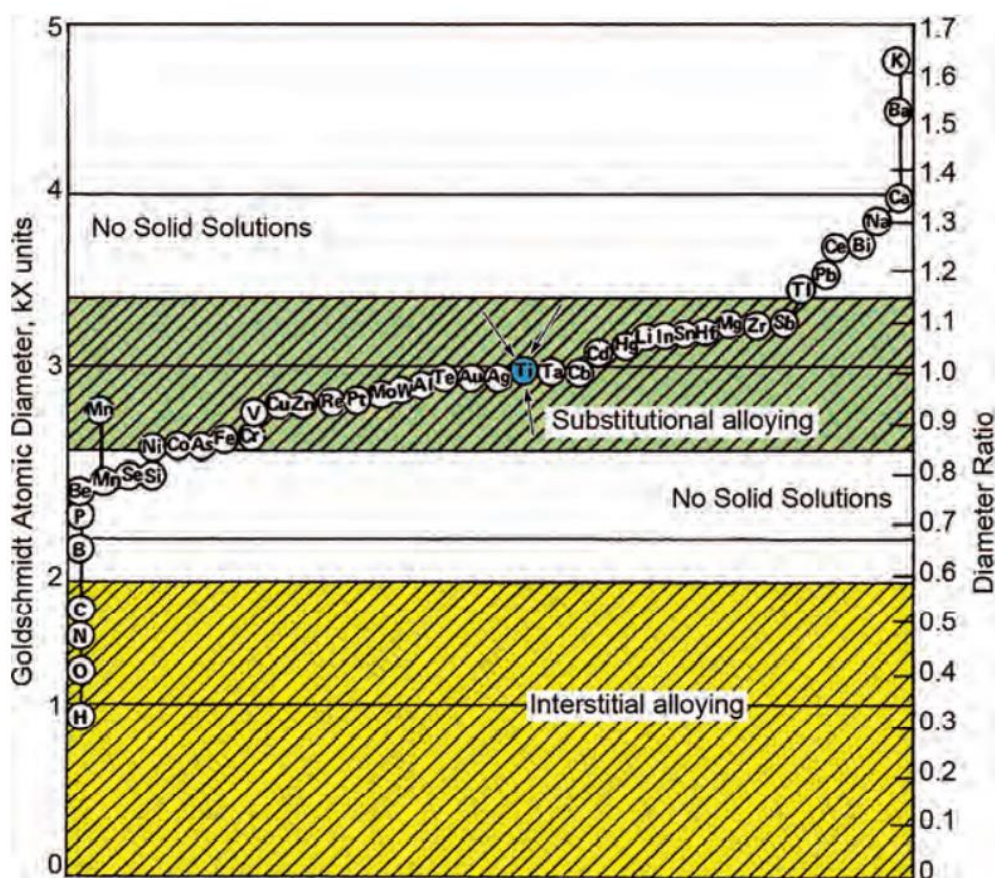


Obr. 5 Závislost dodávek letadel (zeleně) na produkci titanové houby (modře) [9]

4 Slitiny titanu

Po prozkoumání vlastností titanu se samozřejmě technická společnost začala zabývat myšlenkou, jak zlepšit jeho mechanické vlastnosti přidáváním dalších kovů a vytvořením slitin na bázi titanu. Po prvních úspěšných pracích započal rozsáhlý výzkum základních rovnovážných diagramů s různými prvky a také výzkum jednoduchých i složitějších slitin, z nichž se mnohé začaly vyrábět a jiné se dále zdokonalovaly [15].

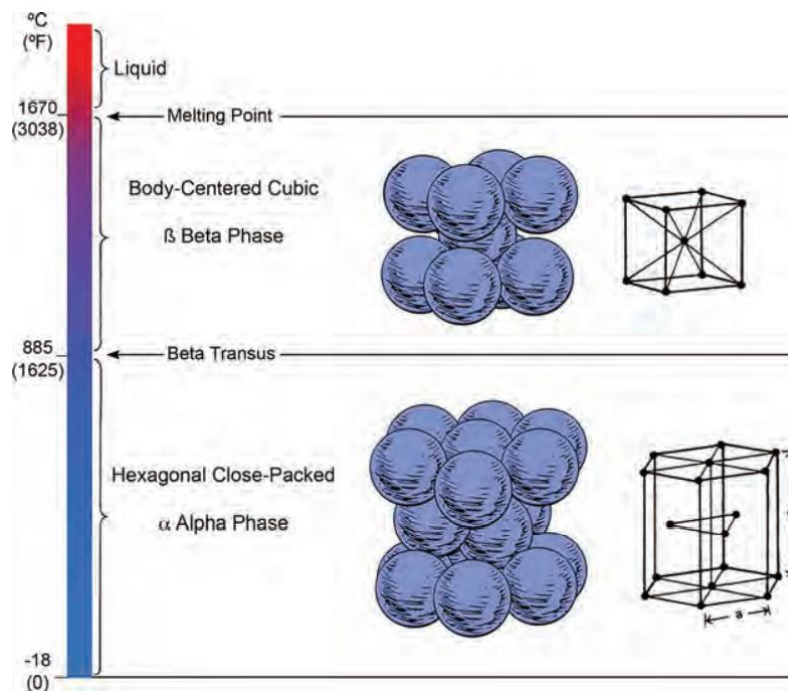
Titan je členem skupiny prvků, které nazýváme přechodné kovy. Tyto kovy mají několik důležitých vlastností, včetně vysoké pevnosti a vykazují alotropické chování neboli polymorfismus (mění svou krystalickou strukturu v závislosti na teplotě) [9]. V porovnání s jinými prvky má titan střední atomový průměr a je relativně lehký. Díky tomu má relativně malou hustotu, která v kombinaci s vysokou pevností činí z titanu užitečný konstrukční kov, který vykazuje příznivé chování při tvorbě různých slitin [1]. Škála prvků pro tvorbu slitin s titanem je relativně velká. Na Obr. 6 jsou zobrazeny atomové poloměry různých prvků v poměru k atomovému poloměru titanu. Jsou zde vyznačeny rozsahy, které mají předpoklady pro tvorbu substitučních nebo intersticiálních tuhých roztoků. Je zde vidět, že pro přípravu slitin nejsou vhodné kovy alkalické, kovy alkalických zemin a některé vzácné kovy, neboť se jejich velikosti atomových poloměrů značně odchylojí od titanu. Pro tvorbu substitučních tuhých roztoků mají významný vliv V. a VI. skupiny periodické tabulky. Plynné prvky (vodík, kyslík, dusík) a uhlík tvoří s titanem intersticiální tuhé roztoky. Ostatní prvky se nehodí pro tvorbu slitin z fyzikálních důvodů (velký rozdíl bodu tání, vysoký parciální tlak par při legování) [15].



Obr. 6 Porovnání atomového poloměru titanu s potenciálními legujícími prvky [9]

4.1 Základní dělení titanových slitin

Při rozdělování titanových slitin je možno vycházet z mnoha hledisek, avšak nejobvyklejší je rozdělení slitin podle struktury v rovnovážném stavu. Také je účelné rozlišovat je podle toho, jak se přidavkem prvku působí na jejich strukturu a jak se stabilizuje jedna nebo druhá fáze. Jak již bylo zmíněno, titan je polymorfní. Na bodu transformace 885 °C se hexagonální fáze α (hcp) mění na kubickou fázi β (bcc) prostorově centrovanou, jak je možné vidět na Obr. 7 [13]. Obě fáze se od sebe liší krystalickou mřížkou, přičemž rychlost fázové přeměny je u čistého titanu tak velká, že ji nelze žádným způsobem potlačit. Rozdílnost obou fází se promítá jak do struktury, tak i do mechanických vlastností. Legující prvky působí na teplotu transformace a na fázové podmínky, vytvářejí tak předpoklady pro strukturu slitin v rovnovážném stavu [15]. Přidání legujících prvků buď stabilizuje fázi α na vyšší teploty, nebo fázi β na teploty nižší. Na základě přítomnosti legujících prvků tak můžeme slitiny titanu rozdělit do tří skupin, které jsou charakterizovány jejich krystalickou strukturou a které existují i za pokojových teplot. Jsou to fáze α , fáze β a fáze $\alpha+\beta$. Každá tato skupina má své charakteristické vlastnosti [9]. Každý typ slitin bude blíže popsán v následujících podkapitolách.



Obr. 7 Polymorfní chování titanu, fázová přeměna v závislosti na teplotě [9]

Pokud některý prvek zvyšuje teplotu přeměny $\alpha \rightarrow \beta$, rozšiřuje se tím oblast α . Vznikají tak slitiny skládající se z fáze α tuhého roztoku daného prvku v titanu. Pokud prvek přidáný k titanu teplotu přeměny snižuje, rozšiřuje se oblast β a omezuje se oblast α . Vytvářejí se tedy předpoklady pro dosažení směsi obou fází, nebo jen fáze β při normální teplotě. Kvůli tomuto se prvky přidávané do titanu rozlišují na α či β stabilizátory. Většina legujících prvků titanu rozšiřuje oblast β , dosáhnout však v rovnovážném stavu čisté fáze β je velice obtížné. Právě proto je mnohem více slitin dvoufázových $\alpha+\beta$ než slitin jednofázových. To, že slitiny α nesmí obsahovat stabilizující prvky β však není podmínkou. Vhodnou kombinací prvků mají tedy slitiny různé vlastnosti. Na rozdělení slitin do zmíněných tří skupin závisí mechanické vlastnosti jednotlivých typů slitin, jejich technologické podmínky výroby a obory použití [9].

4.2 Slitiny typu α

Prvků, které stabilizují fázi α není mnoho. Řadí se k nim především uhlík, kyslík a dusík, přičemž z kovů je nejvýznamnější legující prvek hliník. Slitiny titanu obsahující hliník jsou charakteristické výbornými mechanickými vlastnostmi až do 600 °C, nejsou choulostivé na tepelné zpracování a jsou dobře svařitelné. Mezi negativní vlastnosti slitin α patří omezená tvářitelnost za studena. Právě přítomnosti kyslíku, dusíku a uhlíku již v několika desetínách procenta mají už tak velký vliv na zvýšení pevnosti a zhoršení tvářitelnosti, že jich už nelze použít k legování, naopak jsou považovány za nežádoucí nečistoty. Proto jsou jejich přípustné obsahy omezeny jak u čistého titanu, tak i u všech jeho slitin.

Co se týče procentuálního zastoupení jednotlivých prvků ve slitinách, s nejčastěji se vyskytujícím hliníkem tvoří titan tuhý roztok až do obsahu 26 % Al, jeho obsah ve slitinách je však omezen do 7 %, nýbrž při překročení této hranice se slitiny stávají křehkými za tepla a materiál se za tepla i za studena špatně tváří. Optimálního poměru mezi mechanickými vlastnostmi a tvářitelností za tepla bylo dosaženo slitinou s obsahem 5 % hliníku a 2,5 % cínu. Cín sice patří mezi β stabilizující prvky, často však bývá uváděn jako prvek neutrální, neboť jeho vliv na transformační teplotu a na rozpustnost hliníku je velmi malý a slitina obsahující velké množství cínu je trvale v oblasti fáze α . Dalším významným prvkem je zirkonium. Třebaže je to také β stabilizátor, je ve fázi α neomezeně rozpustný a umožňuje rozšířit oblast tuhého roztoku α při současném snížení teploty transformace. Například obsah zmíněného hliníku umožňuje zvětšit až na 8 % a lze tak možno vyrobit slitinu s vysokou pevností za tepla. I když je okruh slitin α poněkud omezený, tyto slitiny patří mezi nejvýznamnější [15]. Stručný příklad složení některých slitin lze vidět v tabulce 2.

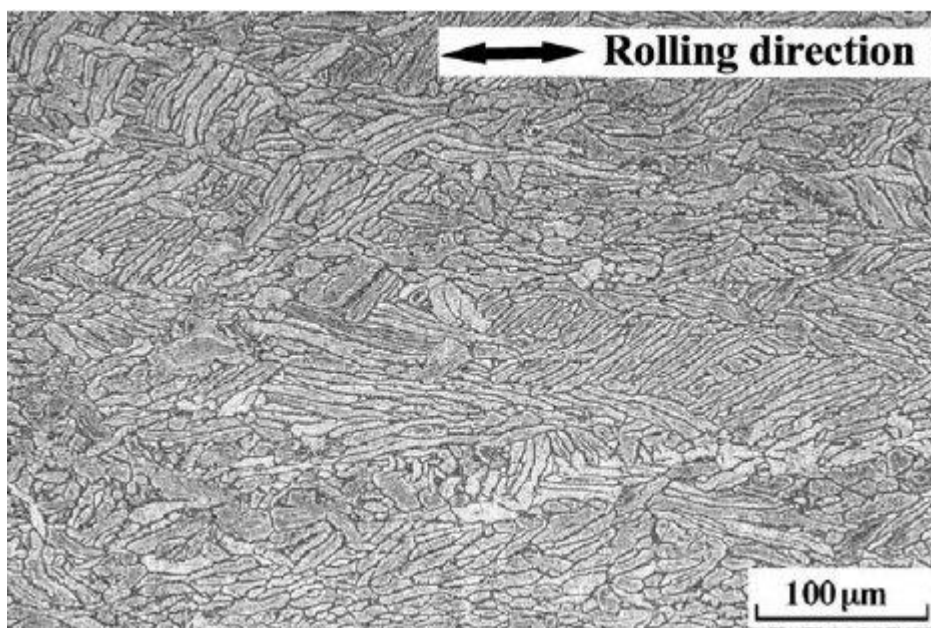
Tabulka 2: Příklad složení slitin α [15]

| Obsah legujících prvků [%] | | | |
|----------------------------|-----|----|---------|
| Al | Sn | Zr | Nb + Ta |
| 5 | | | |
| 5 | 2,5 | | |
| 2,75 | 13 | | |
| 4 | | 12 | |
| 8 | | 8 | 1 |

Charakteristické vlastnosti slitin typu α , jako je tažnost nebo odolnost proti tečení v teplejších prostředích, je činí zajímavé pro použití jako součástí leteckých motorů. Důležitou vlastností je také jejich schopnost udržet si pevnost i během tepelného zpracování. Díky jejich tepelné stabilitě a odolnosti vůči tepelnému stárnutí nevykazuje materiál výraznější změny jeho mechanických vlastností, a to ani při dlouhodobém vystavení vyšším teplotám [16]. V následujících podkapitolách budou blíže popsány vlastnosti a struktury vybraných slitin využívaných v letectví.

4.2.1 TiAl5Sn2,5

Nejznámější slitinou ze skupiny α je TiAl5Sn2,5, která dosahuje pevnosti v tahu 860 MPa a která je vhodná i pro použití při nízkých teplotách [17]. Její vlastnosti se podobají čistému titanu, ale její pevnost je téměř dvojnásobná. I při větší pevnosti ji lze omezeně zpracovat tvářením za studena, používá se však zejména v měkkém stavu. Je strukturně stabilní a dá se používat i za vyšších teplot [13]. Dobrou stabilitu vykazují i svařované spoje, které jsou schopny odolávat oxidaci až do teploty 538 °C. Toho lze využít při výrobě lopatek parních turbín a turbín tryskových motorů. Tuto slitinu je obtížné kovat. Kovaná TiAl5Sn2,5 vykazuje mez kluzu a mez pevnosti v tahu typicky rovnou 758 MPa, respektive 792 MPa. Žiháním lze tyto hodnoty zvýšit až na 779 MPa a 827 MPa, a to bez většího účinku na tažnost slitiny. Vrozená schopnost udržet si tažnost a lomovou houževnatost i za kryogenních teplot umožňuje využít tuto slitinu pro skladování kapalného vodíku v turbočerpadlech kosmických lodí [16]. Tato slitina dnes bývá využívána ve skříních a pístních kroužcích motorů plynových turbín, dále na výrobu součástek pro letecké konstrukce (motory a draky letadel) a konečně v zařízeních pro chemické zpracování [18]. Přehled chemického složení slitiny a její vybrané vlastnosti jsou zobrazeny v tabulkách 3 a 4. Mikrostruktura slitiny TiAl5Sn2,5 je znázorněna na Obr. 8.



Obr. 8: Mikrostruktura slitiny TiAl5Sn2,5 [19]

Tabulka 3: Chemické složení slitiny [18]

| Prvek | Obsah [%] |
|-------|-----------|
| Ti | 92,5 |
| Al | ≤5,0 |
| Sn | ≤ 2,5 |
| Fe | ≤ 0,25 |
| O | ≤ 0,12 |

Tabulka 4: Vybrané vlastnosti slitiny [20]

| | |
|--------------------------------|------|
| Tvrdoost podle Vickerse [MPa] | 325 |
| Tvrdoost podle Brinella [MPa] | 311 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 110 |
| Modul pružnosti ve smyku [GPa] | 48 |
| Hustota [g*cm ⁻³] | 4,48 |
| Teplota tání [°C] | 1590 |

4.2.2 CP titan

Mezi slitiny typu α se řadí také CP-Ti neboli komerčně čistý (*commercially pure*) titan. V závislosti na jeho tržné délce má střední mez kluzu obvykle mezi 140-480 MPa, což vymezuje použití čistého titanu výhradně na součástky leteckých konstrukcí a částí motorů. Přítomnost drobných nečistot v podobě atomárního kyslíku a železa mají na CP titan jak pozitivní, tak i negativní účinky. Tyto nečistoty například zlepšují mez pevnosti v tahu (ku příkladu CP-Ti s obsahem 0,01 % kyslíku mají tuto mez pevnosti přibližně 250 MPa, zatímco CP-Ti s obsahem 0,2-0,4 % kyslíku vykazují pevnost již 300-450 MPa). Mezi nevýhody patří snižování odolnosti proti tečení, zhoršení jeho tepelné stability a snižování tažnosti materiálu. Jeho vlastnosti jako dobrá houževnatost a pevnost za kryogenních teplot (pod $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$) umožňuje použít CP-Ti na výrobu palivových nádrží pro skladování kapalného vodíku v kosmických lodích [16].

4.2.3 TiAl3V2,5

Slitina vyvinuta v 50. letech 20. století, tvárná s dobrou houževnatostí. Mez kluzu se rovná 483 MPa, mez pevnosti v tahu 620 MPa. Vysokotlaká potrubí letadel vyrobená z této slitiny umožňují ušetřit až 40 % váhy, ve srovnání s potrubím vyrobeného z oceli. Díky zpracovatelnosti za studena tato slitina nahradila CP titan při výrobě voštinového jádra letadel. Přijatelná odolnost proti korozi, dobrá svařitelnost a možnost aplikace na výrobu bezešvých trubek bývá tato slitina používána v hydraulických potrubích letadel [16].

4.2.4 TiAl8Mo1V1

Slitina, která byla vyvinuta v 60. letech 20. století, nabízí lepší modul pružnosti v tahu než slitiny $\alpha+\beta$, a to díky většímu obsahu hliníku ve slitině. Tuto slitinu začala ve svých konstrukcích jako první využívat americká nadzvuková letadla. Schopnost slitiny odolávat teplotám až do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ji učinila unikátním materiálem na výrobu lopatek kompresorů. Za normálních teplot vykazuje tažnost 10 % a mez kluzu 930 MPa, avšak horší odolnost proti korozi zabraňuje širšímu využití této slitiny [16].

4.2.5 TiAl6Sn2Zr4Mo2

Teplota plynové turbíny dosahující $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyžaduje na výrobu jejich součástí mnohem tvrdší materiály, vysoce odolné vůči tečení. Tato slitina všechny tyto požadavky splňuje a dodržuje je i za zmíněných teplot. Její mez kluzu dosahuje 930 MPa, mez pevnosti v tahu 999 MPa. Tato slitina se využívá na výrobu součástí proudových motorů, jako jsou rotory, disky a lopatky [16].

4.3 Slitiny typu $\alpha+\beta$

Tato skupina obsahuje velké množství slitin, což je zapříčiněno tím, že u titanových slitin vzniká dvoufázová struktura velmi snadno. Vzájemný poměr fází α a β je určen charakterem rovnovážného diagramu, obsahem legujících prvků a podmínkami zpracování. Záleží také na tom, zda β stabilizující prvek má ve fázi β velkou či malou rozpustnost. Například molybden, niob, tantal a vanad mají neomezenou rozpustnost ve fázi β a malou rozpustnost ve fázi α , proto vytvářejí systémy s velkým rozsahem fází $\alpha+\beta$ bez intermediárních sloučenin. Oproti tomu ostatní β stabilizující prvky mají ve fázi $\alpha+\beta$ rozpustnost omezenou (kromě zirkonia), tudíž vznikají intermetalické sloučeniny a při určitém obsahu přídatného prvku a různé teplotě nastává eutektoidní rozpad fáze β na tuhý roztok α a sloučeninu titanu s legujícím prvkem. Čím je eutektoidní teplota nižší a eutektoidní obsah legujícího prvku vyšší, tím obtížněji eutektoidní rozpad probíhá. Vzniklé intermetalické sloučeniny mají silný vliv na mechanické vlastnosti slitiny, často však způsobují křehkost. Zabránit či zpomalit vylučování intermetalických sloučenin se dá různou kombinací β stabilizujících prvků, tím se také zlepšuje termická stabilita slitiny. Kvůli komplikovanosti podmínek u dvoufázových slitin je vhodné tuto skupinu ještě dále rozdělit. Nejvýhodnějším kritériem pro toto dělení je dle vzájemného poměru obou fází. Fáze β je jednotlivými prvky různě stabilizována a podle jejich charakteru a obsahu ve slitině dostaneme slitiny buď slabě nebo silně β stabilizované. Toto rozdělení pomáhá volit podmínky zpracování, odhadnout mechanické vlastnosti a obory jejich použití. Vzorovým prvkem pro toto rozdělení je hliník, který má vliv na množství fáze α , a tedy na vzájemný poměr obou fází. Slitiny neobsahující hliník jsou silně β stabilizované, naopak slitiny s velkým obsahem hliníku slabě β stabilizované.

Jako α stabilizátory působí ve dvoufázových slitinách prvky uhlík, kyslík a dusík, které mohou mít nepříznivý vliv na strukturu slitiny, mechanické vlastnosti i zpracování. Proto musí být v některých slitinách obsah uhlíku a kyslíku, tedy nečistot, obzvláště malý, mají-li být zaručeny některé vlastnosti. Obsah kyslíku by neměl překračovat hodnotu 0,1 % a v žádném případě 0,2 %, neboť při tomto obsahu se začíná tvořit karbid titanu. Největší přijatelný obsah kyslíku pak závisí na typu slitiny, neměl by být zpravidla větší než 0,15 až 0,20 %. Vodík sice patří mezi prvky β stabilizující, je však jen omezeně rozpustný, takže se již při jeho malém obsahu vylučuje hydrid titanu. Dalším důvodem k legování hliníku do dvoufázových slitin je to, že hliník zvětšuje rozpustnost vodíku. Díky tomu se slitiny stávají na obsah vodíku méně citlivé. Velmi citlivé na obsah vodíku jsou naopak slitiny silně β stabilizované. Příklad složení některých slitin lze vidět v tabulce 5.

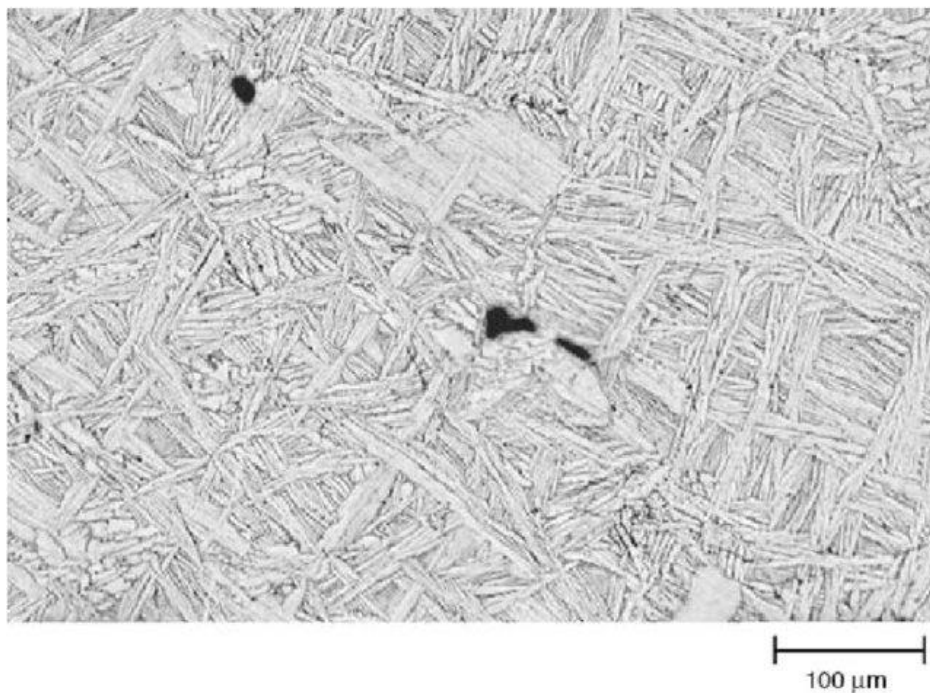
Tabulka 5: Složení dvoufázových slitin $\alpha+\beta$ [15]

| Obsah legujících prvků [%] | | | | | |
|----------------------------|------|------|--------|-----|-----|
| Al | Cr | Fe | Mn | Mo | V |
| | 2 | 2 | | 2 | |
| | 1 | 1 | 3 | 1-2 | 1 |
| 1,5-2,5 | | | 2-3,25 | | |
| 4 | | | | 4 | 4 |
| 5 | 2,75 | 1,25 | | | |
| 6 | | | | 1,5 | 3,5 |

Základní výhodou dvoufázových slitin je jejich velká pevnost za normálních teplot a u některých slitin i dobrá tvářitelnost za studena. Za vyšších teplot (400 °C) mají však tyto slitiny poměrně malou pevnost. Dále jsou slitiny $\alpha+\beta$ citlivé na tepelné zpracování a na obsah nečistot, z nichž zejména vodík způsobuje křehkost. Nevýhodou silně stabilizovaných slitin je pak jejich malá tepelná stabilita a omezená svařitelnost [15]. Slitiny typu $\alpha+\beta$ jsou však pro výrobce letadlových komponent nejpříznivější. Mezi největší výhody patří dobrá lomová houževnatost, kujnost, pevnost v tahu a odolnost proti únavovému poškození [16].

4.3.1 TiAl6V4

TiAl6V4 je nejběžnějším typem dvoufázové slitiny. Její předností je dobrá svařitelnost a tvárnost. Bývá využívána k výrobě tyčí a lisovaných profilů, je vhodná na výkovky, a dokonce i na výrobu plechů. Nejčastější využití však nalézá na discích a lopatkách kompresorů a v namáhaných součástkách motorů, které pracují za zvýšených teplot. Při tepelném zpracování se musí rychle ochladit z teplot 850 až 950 °C a žíhat při 480 až 540 °C. Volba teplot poté určuje výsledné vlastnosti, zejména poměr pevnosti a tažnosti [13]. Z celkového množství titanu používaného v součástkách letadel (potahové panely, výztuhy, součásti křídel, náhradní díly) asi 80 % tvoří slitina TiAl6V4. Tato slitina má také majoritní podíl mezi součástkami proudových motorů (až 60 %) a v draku letadel (80-90 %). Součástky pracující za nižších teplot (pod 300 °C) a ventilátory kompresorů stíhačky *F-35 Lightning-II* bývají také vyráběny z této slitiny. Kovaná TiAl6V4 je také schopna poskytnout dobrou nárazovou pevnost, kterou vyžadují kokpity letadel při kolizi s ptactvem. Tato slitina bývá rovněž hojně využívána v hlavách rotorů různých helikoptér [16]. Přehled chemického složení slitiny a její vybrané vlastnosti jsou zobrazeny v tabulkách 6 a 7. Mikrostruktura slitiny je znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9: Mikrostruktura slitiny TiAl6V4 [21]

Tabulka 6: Chemické složení slitiny [18]

| Prvek | Obsah [%] |
|-------|-----------|
| Ti | 90,0 |
| Al | 6,0 |
| V | 4,0 |
| C | ≤ 0,1 |
| O | ≤ 0,2 |
| N | ≤ 0,05 |
| H | ≤ 0,0125 |
| Fe | ≤ 0,3 |

Tabulka 7: Vybrané vlastnosti slitiny [20]

| | |
|--|-------|
| Tvrdoost podle Vickerse [MPa] | 340 |
| Tvrdoost podle Brinella [MPa] | 334 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 110 |
| Modul pružnosti ve smyku [GPa] | 40 |
| Hustota [g/cm ³] | 4,429 |
| Teplota tání [°C] | 1604 |
| Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | 7,1 |
| Minimální provozní teplota [°C] | -273 |
| Maximální provozní teplota [°C] | 893 |

4.3.2 TiAl7Mo4

Jedna z dalších důležitých dvoufázových slitin. Za normálních i zvýšených teplot má vyšší pevnost než slitina TiAl6V4, avšak její nevýhodou je horší svařitelnost. Její zpracování a použití je podobné jako u TiAl6V4. Je citlivá na tváření za tepla, za studena je prakticky netvárlivá. Pro dlouhodobé zatížení není obvykle dostatečně stabilní [13].

4.3.3 TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2 + Si

Slitina vyvinuta v 70. letech 20. století. Tato slitina je známá pro svou skvělou plasticitu, tepelnou stabilitu a odolnost vůči oxidaci. 15 % přítomnost křemíku zlepšuje odolnost slitiny proti tečení. Je skvěle kalitelná, mez kluzu se rovná 1034 MPa a mez pevnosti 1069 MPa. Využívá se zejména v trupu letadel, pro úchyty motorů, konstrukce křidel a pro různé přepážky. Ze známých stíhacích letounů tuto slitinu využívá *Lockheed F-22 Raptor* [16].

4.3.4 TiAl6Sn2Zr4Mo6 a TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4

Vynikající odolnost proti tečení a schopnost odolávat teplotám až do 450 °C učinila slitinu TiAl6Sn2Zr4Mo6 jasnou volbou pro výrobu součástek leteckých motorů. Součástky vykazují tažnost do 10 % a mez kluzu 1105 MPa. Ještě lepší vlastnosti má slitina TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4, která byla vyvinuta v 70. letech minulého století. Mez kluzu u ní nabývá hodnot 1150 MPa a mez pevnosti 1250 MPa. Její vynikající lomová houževnatost, odolnost vůči šíření trhlin a schopnost odolávat teplotám do 350 °C nabízí konstruktérům použít tuto slitinu na hřídele a ventilátory letadel [16].

4.4 Slitiny typu β

Při dalším zvětšování obsahu β stabilizujících prvků se lze postupně dostat až ke slitinám složeným pouze z fáze β . Nicméně zajistit, aby ve struktuře slitiny byla čistá fáze β i za normálních teplot je velmi obtížné. Z tohoto důvodu uběhla poměrně dlouhá doba, než se některé ze slitin tohoto typu začaly vyrábět alespoň poloprovozně. Mezi základní požadavky patří to, aby teplota fázové přeměny $\alpha \rightarrow \beta$ byla značně snížena nebo aby byl průběh transformace podstatně zpomalen. Toho může být dosaženo velkým obsahem přídavných prvků (až 30 %) nebo vhodnou kombinací prvků. Struktury β lze dosáhnout zakalením nebo dokonce i normálním ochlazením, v tomto stavu je však většina slitin nestabilní a při dlouhodobém ohřevu nastávají strukturní změny.

Mezi výhody slitin β patří jejich velmi dobrá tvářitelnost a vysoká pevnost do teplot dosahujících 500 °C. Jsou dobře svařitelné a nepotřebují dlouhodobé vytvrzování. Mezi nevýhody patří velká citlivost na nečistoty, zejména na kyslík a uhlík, které silně potlačují stabilitu fáze β , kde na stabilitě závisí převážně svařitelnost [15]. Příklad složení některých slitin lze vidět v tabulce 8.

Tabulka 8: Složení jednofázových slitin β [15]

| Obsah legujícího prvku [%] | | | | |
|----------------------------|----|----|----|----|
| Al | Cr | Fe | Mo | V |
| | | | 30 | |
| 1,3 | | 5 | | 8 |
| 3 | 11 | | | 13 |

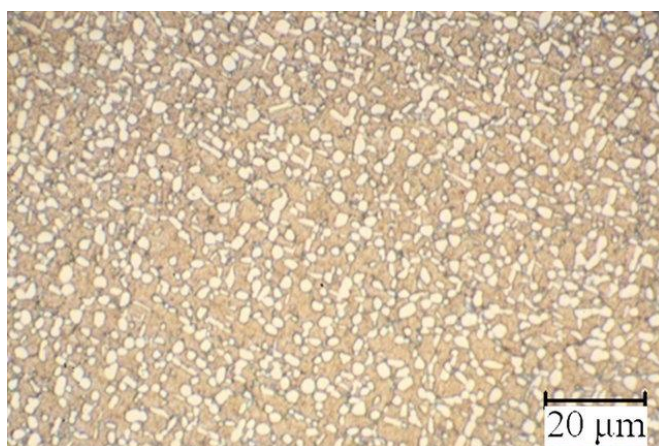
Slitiny β jako samostatnou třídu slitin jako první kategorizoval R. I. Jaffee. Počáteční výzkum tímto směrem vedl k vyvinutí slitiny TiV13Cr11Al3, která nabízela vysokou pevnost (1276 MPa), ale nereagovala dobře na tepelné zpracování. Až přidáním izomorfních β stabilizátorů (Hf, V, Ta, Cr, Nb, Mo) pro chlazení kovového titanu, za účelem odolat martenzitickému rozkladu fáze β , se posunula teplotní hranice transformace $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ směrem k pokojovým teplotám. Vlastností β slitin, jako je mimořádná odolnost proti únavě a vysoká pevnost v tahu, se začalo využívat u vysoce zatížených konstrukčních dílů, zejména v draku letadel [16].

4.4.1 TiAl3Mo8Cr11 a TiAl3V13Cr11

Nejnámější zástupci ze skupiny jednofázových slitin. Jsou to slitiny silně legované, které se většinou tepelně zpracovávají. Tvářením za studena lze pevnost zvýšit až na 1500 MPa při tažnosti 3 až 5 %. Mezi výhody se řadí dobrá tvárnost i dobrá svařitelnost, mezi nevýhody patří velký obsah legujících prvků, který zvyšuje měrnou hmotnost slitiny a zároveň náročnost na čistotu výchozích surovin a celého zpracování. Plechy vyrobené z těchto slitin jsou konstrukční materiál pro součástky v leteckém a raketovém průmyslu, zejména pro výrobky, u kterých je vyžadován větší stupeň tváření za studena [13].

4.4.2 TiV10Fe2Al3

Společnost TIMET si v roce 1974 nechala patentovat chemické složení nově vyvinuté titanové slitiny TiV10Fe2Al3, která vykazovala výjimečně vysokou lomovou houževnatost, tažnost a pevnost v tahu. První použití této slitiny se uskutečnilo na přistávacím podvozku letadla *Boeing 777*. Kromě vnitřních a vnějších válců byly všechny součástky podvozku vyrobeny právě z této slitiny. Kromě dosažení požadované pevnosti vedlo použití této slitiny také k celkovému snížení hmotnosti letadla o 270 kg. V roce 1980 výjimečné vlastnosti této slitiny (mez pevnosti v tahu až 1240 MPa) přesvědčily konstruktéry aplikovat tuto slitinu také na drak letadla *Boeing 757* i na budoucí letecké konstrukce [16]. Přehled chemického složení slitiny a její vybrané vlastnosti jsou zobrazeny v tabulkách 9 a 10. Mikrostruktura slitiny je znázorněna na Obr. 10.



Obr. 10: Mikrostruktura slitiny TiV10Fe2Al3 [22]

Tabulka 9: Chemické složení slitiny [18]

| Prvek | Obsah [%] |
|-------|-----------|
| Ti | 85,0 |
| V | 10,0 |
| Fe | 2,0 |
| Al | 3,0 |
| O | ≤ 0,13 |

Tabulka 10: Vybrané vlastnosti slitiny [20]

| | |
|--------------------------------|------|
| Tvrдость podle Vickerse [MPa] | 318 |
| Tvrдость podle Brinella [MPa] | 304 |
| Modul pružnosti v tahu [GPa] | 110 |
| Modul pružnosti ve smyku [GPa] | 41 |
| Hustota [g·cm ⁻³] | 4,65 |
| Teplota tání [°C] | 2188 |

4.4.3 TiV15Cr3Al3Sn3

V roce 1970 podpořilo Letectvo Spojených států amerických projekt na výzkum titanové slitiny fungující za provozu při nízkých teplotách. Společnosti Lockheed a TIMET během experimentů snížili obsah chromu na minimum a válcováním za studena vyvinuli svitky a plechy slitiny TiV15Cr3Al3Sn3. Během prvních zkušebních aplikací bylo více než 100 součástek konstrukce bombardéru *Rockwell-B1B* úspěšně otestováno. Vynikající tvářitelnost této slitiny vedla k výraznému snížení výrobních nákladů vzhledem ke konkurenčním slitinám. V 90. letech minulého století pak tato slitina nahradila materiál CP-Ti ve vzduchotechnických trubkách *Boeingu 777*, což vedlo k úspoře hmotnosti draku letadla o 63,5 kg. Pružiny vyrobené z této slitiny mají o 70 % menší hmotnost, o 50 % menší objem a jsou více odolné proti korozi než pružiny vyrobené z oceli [16].

4.4.4 TiAl3V8Cr6Mo4Zr4

V 60. letech 20. století dospěla společnost RMI titanium Co. k rozhodnutí vyvinout novou slitinu TiAl3V8Cr6Mo4Zr4, která měla nahradit slitinu TiV13Cr11Al3 používanou pro rámy a komponenty letadel. Výjimečné vlastnosti, které tato slitina nabízí, jako je vynikající kalitelnost, dobrá odolnost proti korozi, nízká hmotnost a skvělá pevnost, však nemohou prolomit pomyslnou bariéru, kterou jsou omezení v produkci této slitiny, zejména příliš vysoká výrobní cena a náročná výroba samotná. Obvykle se taví plazmovým obloukem a je zpracovávána za vysokých teplot (795 °C) buď vytlačováním, válcováním či rýhováním. Při působení vhodných roztoků po dobu jedné hodiny za teplot mezi 790-925 °C a následným ochlazením se zvyšuje pevnost této slitiny. Aplikace této slitiny na podvozek letadla nabízí ve srovnání s použitím jiných konvenčních ocelí zlepšenou odolnost proti korozi a snížení hmotnosti až o 70 % [16].

4.4.5 TiMo15Al3Nb3Si0.2

Slitina TiMo15Al3Nb3Si0.2 byla vyvinuta společností TIMET v roce 1988 a nabízela několik jedinečných vlastností, jako např. možnost vyrábět z této slitiny fólie, mimořádnou pevnost, odolnost proti degradaci a také schopnost udržet si tyto vlastnosti i za vysokých teplot. Pro přímé použití v leteckých konstrukcích lze jeho tloušťku zmenšit až na 4 mm, a to kováním a válcováním za studena. Při působení tlakových sil umožňuje skvělá tváritelnost slitiny snížit objem součástky až o 80 %, aniž by došlo ke zhoršení vlastností a ke vniku prasklin. Po prvním použití této slitiny bylo vyrobeno mnoho součástek pro trysky proudových motorů, ať už civilních či vojenských letadel. Za zmínku stojí stroje jako *Rolls-Royce Trent-400*, *Boeing 777* a *Airbus-A340*. Po výměně součástek dopravního letadla *Boeing 777* ze slitiny Inconel-625 na slitinu TiMo15Al3Nb3Si0.2 bylo ušetřeno 164 kg hmotnosti stroje [16].

4.4.6 TiV35Cr15

V 80. letech minulého století byly zaznamenány poruchy sestavy výfukové trysky (vyrobené z konvenčních titanových slitin) v důsledku vysokého tepelného napětí spalování v motoru Pratt and Whitney F-119 stíhacího letounu *F22-Raptor*. Společnost Teledyne Wah Chang Albany proto vyvinula stabilní β slitinu s obsahem 35 % vanadu a 15 % chromu. Příprava této slitiny trvala téměř 5 let. Slitina si zachovává svou fázi i stabilitu i bez kalení. Přítomnost chromu ve vyšších hmotnostních procentech pomáhá absorbovat tepelnou energii až do měrného skupenského tepla tání. Přítomnost vanadu zase stabilizuje β fázi a zpevňuje tuhý roztok TiV35Cr15, zatímco uhlík vytváří karbonitridy. Tato slitina nabízí mimořádnou odolnost vůči tepelnému hoření v odsávacích systémech letadel a zároveň si zachovává svoji pevnost i při extrémních teplotních podmínkách, i když doporučená teplotní hranice je 540 °C. Čína a Spojené království se v minulých desetiletích zajímaly právě výzkumem slitin odolných vůči hoření, zejména metalurgickými úpravami přidáním obsahu hliníku a uhlíku [16].

5 Použití titanu a jeho slitin v letectví

5.1 Úvod

Titan a jeho slitiny jsou vynikajícími kandidáty pro využití v leteckém průmyslu, především díky vysokému poměru pevnosti ku hmotnosti a tolikrát zmiňované skvělé odolnosti vůči korozi. Nicméně, použití titanu je silně limitováno relativně vysokou cenou v porovnání s konkurenčními materiály, zejména se slitinami hliníku a oceli. Právě proto musí být výhody použití titanu vyvažovány vysokými náklady [23]. Prvotní využití našel titan v reaktivních letadlech, balistických střelách a raketách, přirozeně zejména ve vojenské technice. To ovšem znamenalo, že jakýkoliv výzkum, dosažené výsledky a získané zkušenosti byly přísně utajeny. Ku příkladu ve Spojených státech bylo do roku 1957 90 % vyrobeného titanu určeno pro strategické zásoby a vojenské účely. Otázka ceny se dostala do popředí, až když byl titan v západních státech uvolněn pro civilní potřebu. Také v civilních oborech použití titanu se hlavní pozornost zaměřila nejprve na letectví, neboť právě v tomto odvětví techniky bylo možné převzít nejvíce zkušeností z vojenského prostředí. To také zapříčinilo to, že podstatná část spotřeby titanu v západních zemích (zejména USA) připadá právě na použití v leteckém průmyslu. Až druhořadými spotřebiteli jsou průmysly chemické, strojírenské, dopravní a potravinářské [24]. Srovnání využití titanu ve světě je znázorněno v tabulce 11.

Tabulka 11: Světová poptávka po titanu a jeho využití v různých odvětvích průmyslu [9]

| | EU a Severní Amerika | Čína | Zbytek světa | Celkem |
|-----------------------|----------------------|-----------|--------------|------------|
| 2012, [kt] | | | | |
| Průmyslové aplikace | 16 | 44 | 27 | 87 |
| Letectví | 45 | 5 | 10 | 59 |
| Spotřebitelské a jiné | 12 | 4 | 4 | 19 |
| Celkem | 72 | 53 | 40 | 165 |
| 2018, [kt] | | | | |
| Průmyslové aplikace | 19 | 70 | 35 | 123 |
| Letectví | 52 | 7 | 12 | 71 |
| Spotřebitelské a jiné | 13 | 5 | 4 | 22 |
| Celkem | 83 | 82 | 51 | 216 |

Potřeba nových materiálů v letectví byla vyvolána zejména zvýšenými požadavky na jakost materiálu při postupném zvětšování rychlosti letadel. Bylo dokázáno, že při rychlosti Mach 4 dosahují povrchové teploty trupu a křídel letadel 500 °C, při rychlosti Mach 5 1000 °C a při Mach 6 dokonce 1400 °C. Je tedy zřejmé, že těmto požadavkům nemohly běžné slitiny hliníku či hořčíku vyhovět, jednak kvůli svým mechanickým vlastnostem a také pro jejich nedostatečnou odolnost proti uvedeným teplotám. Vysokopevnostní oceli mají oproti tomu velkou měrnou váhu, zatímco slitiny titanu vykazují příznivý poměr meze pevnosti k měrné váze nejen za normálních, ale i při vyšších teplotách. Titanové slitiny také vyhovují přísným požadavkům na rovnost plechů malé tloušťky a na dobrou svařitelnost, které jsou nutné pro výrobu voštinových konstrukcí letadel. Právě tyto vlastnosti vedly ke zvětšení množství používaných polotovarů z titanu a jeho slitin u vojenských bojových letadel, nadzvukových i mezikontinentálních bombardovacích letadel a později v civilních dopravních letadlech [15].

5.2 Požadavky na materiály v letectví

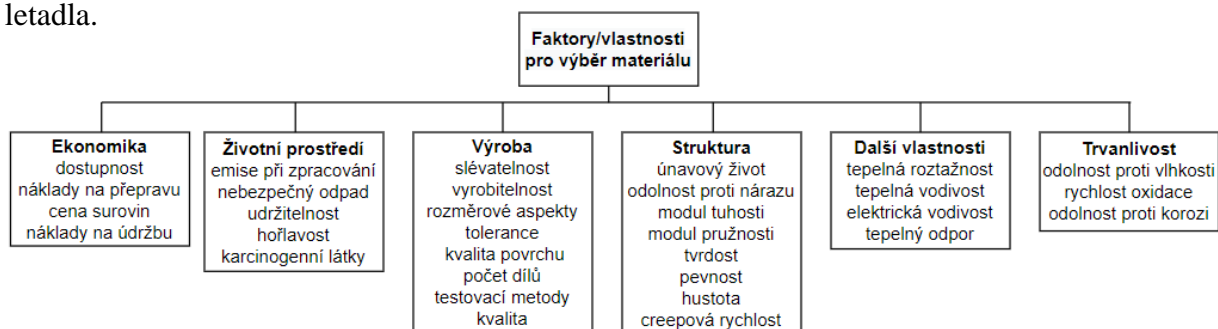
Omezená dostupnost přírodních zdrojů (surovin a paliv) a jejich neustálá spotřeba donutila letecké inženýry navrhnout pokročilou systematiku letecké dopravy, která by zajišťovala optimální výkon a zároveň minimalizovala spotřebovanou energii. Dlouhodobé cíle mezinárodní rady pro letecký výzkum a zvýšené nároky na ochranu životního prostředí si vyžádaly vylepšený design leteckých prostředků. Tehdejším mottem se stalo létat rychleji, dále, ve větších letadlech a při nižší spotřebě paliva. To znamenalo konstruovat letadla s komplexnější aerodynamikou, a hlavně s menší hmotností. Snaha ušetřit co nejvíce paliva a energie znamenala šetřit váhu kdekoliv to bylo možné. Kromě nízké hmotnosti však materiály musely splňovat řadu dalších vlastností, jako je vysoká tepelná kapacita, dobrá houževnatost, odolnost proti oxidaci a korozi, dobrá tepelná vodivost a vysoká pevnost. Možnosti, jak snížit hmotnost součásti letadla o 10 % jsou následující [16]:

- a) Snížit hustotu kovu o 10 % (nejúčinnější přístup)
- b) Zvýšit pevnost kovu o 35 %
- c) Zvýšit tuhost kovu o 50 %
- d) Zvýšit toleranci kovu k poškození o 100 %

Nejdůležitější kritéria pro volbu materiálu na letecké komponenty [25]:

- ◁ Počáteční náklady na nákup nového letadla
- ◁ Náklady na výměnu nebo upgrade starších komponent za novější
- ◁ Splnění konstrukčních požadavků na komplexnost leteckých motorů a rámu
- ◁ Splnění přísných požadavků na spotřebu paliva
- ◁ Úroveň výkonu v reálných podmínkách (při provozních parametrech)
- ◁ Splnění požadavků na výkon leteckých motorů
- ◁ Náklady na údržbu
- ◁ Provozní životnost letadla
- ◁ Spolehlivost a bezpečnost
- ◁ Plán na likvidaci/recyklaci odstavených letadel
- ◁ Splnění norem ochrany životního prostředí

Vlastnosti požadované po materiálu pro využití v letectví jsou úzce ovlivňovány konstrukcí, jenž má být vyrobena, jejím designem, typem zatěžování a provozních podmínkách [16]. Na Obr. 11 jsou shrnuty základní faktory a vlastnosti pro výběr materiálu vhodného k návrhu letadla.



Obr. 11: Základní faktory a vlastnosti pro výběr materiálu vhodného k návrhu letadla [16]

Obecně se celková vzletová hmotnost letadla skládá z přibližně 5-7 % hmotnosti motoru, 7-12 % hmotnosti trupu a 8-14 % hmotnosti křídel. Při výrobě motoru a dalších konstrukčních částí letadla je tedy nutné zvážit volbu materiálu, nejlépe volit ten s co nejnižší hmotností [25]. Výběr materiálu s výše uvedenými vlastnostmi (nebo s většinou z nich), který si navíc je schopen tyto vlastnosti udržet i během provozu (po celou dobu životnosti součástky letadla), je vždy náročným úkolem [16]. Letečtí inženýři mají pro volbu k dispozici přibližně 120000 různých materiálů (65000 kovů, 10000 keramických materiálů, 15000 plastů, dřeva, kompozitů atd.), ze kterých lze součástku vyrobit. Avšak pouze 0,05 % ze zmíněného množství je vhodných (s ohledem na potřebné vlastnosti) pro letecké komponenty [25]. Odůvodnění potřebných vlastností materiálu pro využití v letectví je podrobně zobrazeno v tabulce 12.

Tabulka 12: Vlastnosti materiálu a jejich důležitost pro letecké komponenty [16]

| Vlastnost materiálu | Letecké komponenty |
|-----------------------------|---|
| Vysoká pevnost a tuhost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Vysoká statická a dynamická zatížení působící na součástky podvozku během vzletu ◁ Křídla, ocas a trup jsou namáhána na tlak a na vzpěr ◁ Úhel vzepětí křídel způsobuje velký tlak na trup letadla ◁ Na gondoly motoru působí velké tlakové síly (díky velké hmotnosti motoru) ◁ Natočení letadla během letu působí na trup velkým smykovým napětím |
| Dobrá lomová houževnatost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Odolávat vysokým statickým zatížením a silám působícím při přistání |
| Dobrá únavová pevnost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Odolávat variabilním zatížením (nárazy větru, turbulence) ◁ Vojenská letadla čelí během akce mnoha manévřům ◁ Díky cyklickému natlakování a odtlakování dochází v materiálu pláště trupu k únavovému opotřebení |
| Vysoká tepelná odolnost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Odolávat teplotě v proudových motorech (1500 °C) |
| Dobrá odolnost proti korozi | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Lety při vysokých i nízkých teplotních podmínkách ◁ Kontakt s korozivními kapalinami (odstraňovač laku karoserie, letecké palivo a maziva) |
| Dobrá rázová houževnatost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Odolnost proti poškození při nárazu ptactva ◁ Kontakt přední části letadla s různými částicemi během vzletu ◁ Intenzivní silové zatížení působící na součástky podvozku |
| Vysoká životnost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Po celou dobu životnosti letadla (obvykle 4000-8000 hodin pro vojenská, 30000-60000 hodin pro dopravní) |
| Nízká hmotnost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Drak má obvykle až 40 % podíl na celkové váze letadla, nízká hmotnost materiálu tuto váhu snižuje |
| Dobrá zpracovatelnost | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Svařování a nýtování v draku letadla |
| Cena | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Počáteční náklady na nákup nového letadla ◁ Náklady na údržbu |
| Dodací lhůta | <ul style="list-style-type: none"> ◁ Méně času na přípravu (snadné obrábění) hotové součástky |

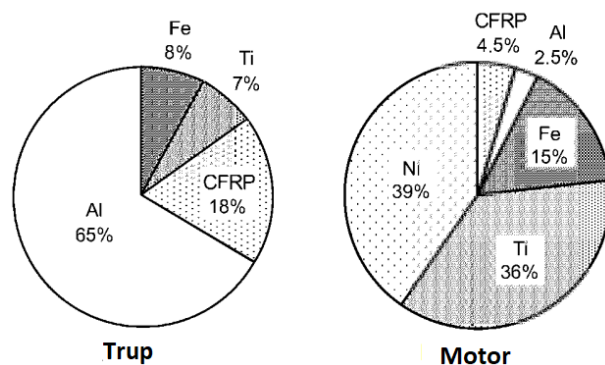
5.3 Titan jako kandidát pro aplikaci v letectví

V porovnání s ocelí nebo se slitinami hliníku je titan mnohem mladším konstrukčním materiálem. První slitiny titanu byly vyvinuty na konci čtyřicátých let 20. století ve Spojených státech amerických. Mezi první slitiny se řadila i TiAl6V4, která se dodnes v letectví řadí mezi nejpoužívanější [7]. První použití titanu v leteckém průmyslu se datuje na počátek padesátých let 20. století, kdyby byla slitina titanu poprvé aplikována na několik součástek proudového motoru bombardéru *B52*. Další aplikace titanu byla zaznamenána v roce 1952 na gondoly motoru letadla *DC-7*. Od té doby poptávka po tomto „kovu studené války“ značně vzrostla a titan se stal materiálem s nejrychlejším rozvojem v leteckém průmyslu [16]. Význam titanu v tomto období vyplývá nejlépe z porovnání množství použitých polotovarů. U amerických vojenských bojových letadel se spotřebovalo 500 až 700 kg titanu jen na konstrukce draku, u zmíněného bombardéru *B52 W* a pozdějšího modelu *B58* bylo spotřebováno na motory a konstrukci až 2450 kg titanu na jedno letadlo, u dopravního letadla *DC-8* bylo 1667 součástek z titanu a jeho slitin. V roce 1959 a 1960 se v USA počítalo s 450 až 750 kg konstrukčních částí z titanových slitin na jedno civilní dopravní letadlo, u tryskových a turbovrtulových dopravních letounů byla spotřebována nejméně 1 tuna titanových plechů a výkovek. Tato značná množství titanu byla odůvodněna tím, že úspora 1 kg váhy motoru ušetří 3 až 10 kg konečné váhy letadla, zmenší se spotřeba paliva, provozní náklady a zvětší se také dolet a schopnost manévrování. Například 500 kg titanu spotřebovaného při stavbě tryskového dopravního letadla *DC-8* znamenalo úsporu váhy 5 lidí se zavazadly. Za 7 let vykonalo letadlo přes 5000 letů a při každém letu bylo ušetřeno v průměru 525 dolarů. Dále použitím titanu klesla hodnota poměru váhy k výkonu u motoru *J 47* z 0,5 na 0,15. Při přechodu k raketám a raketové technice nastala silná konkurence slitinových ocelí a titanových slitin, zároveň se však otevřely nové možnosti pro využití příznivých vlastností titanu [26].

Jak již bylo zmíněno, titan nabývá vynikajících vlastností, mezi něž patří vysoká tržná délka a skvělá odolnost proti korozi. Jeho vlastnosti jej činí ideálním kandidátem pro aplikaci v letectví v oblastech, ve kterém je kombinace hmotnosti, pevnosti, odolnosti proti korozi a velké teplotní stability klíčová a kterou slitiny hliníku, vysokopevnostní oceli a vysoce legované slitiny na bázi niklu nejsou schopny tak dobře zajistit. Hlavní důvody pro použití titanu v letectví jsou tyto:

- ◁ Snížení hmotnosti (náhrada za oceli a slitiny na bázi niklu)
- ◁ Provozní teplota (náhrada za slitiny hliníku, slitiny na bázi niklu a oceli)
- ◁ Odolnost proti korozi (náhrada za slitiny hliníku a nízkolegované oceli)
- ◁ Galvanická kompatibilita s polymerními matricovými kompozity (náhrada za slitiny Al)
- ◁ Omezený prostor (náhrada za slitiny hliníku a oceli)

Obr. 12 ukazuje hmotnostní podíl různých materiálů v moderním velkém dopravním letadle. Například trup letadla *Airbus A340* je téměř je dvou třetin vyroben z hliníku. Slitiny hliníku zde zaobírají přibližně 7 % hmotnosti, což je srovnatelné s hmotnostním podílem ocelí. Nicméně v proudových motorech titan zaujímá až třetinu hmotnosti, což jej činí druhým nejčtenějším materiálem hned po vysokolegovaných slitinách na bázi niklu. Co se pak týče celkového objemu, je titan nejčtenějším materiálem proudových motorů.



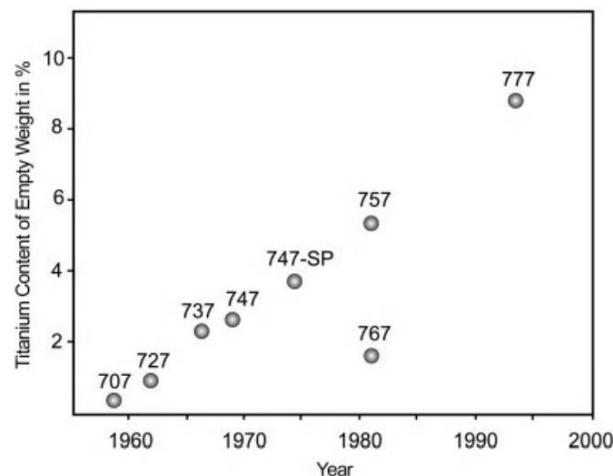
Obr. 12: Procentuální hmotnostní podíl plastů tvrzených uhlíkovými vlákny a slitin oceli, hliníku a titanu na konstrukční hmotnosti trupu a motoru moderních dopravních letadel [7]

Kromě materiálových vlastností je pro výběr materiálu k návrhu letadla klíčová také cena. Ta zahrnuje jak náklady na nákup surovin, tak náklady na výrobu hotové součástky. Proto bývá kromě požadovaných materiálových vlastností zohledňována také jeho slévateľnost, obrobiteľnosť, tváriteľnosť a svařitelnost, což jsou důležité faktory ovlivňující konečné náklady. Obzvláště velká pozornost se upíná k předpokládané životnosti součástí s přihlédnutím k nákladům na údržbu a případné opravy. Proto jsou konstruktéři letadel a výrobci slitin titanu nuceni plnit požadavky leteckých společností na maximalizaci výkonu při současném snížení celkových nákladů [7].

V podstatě lze říct, že největším spotřebitelem titanu a jeho slitin v letectví jsou letouny pro rychlosti 3,5 Machova čísla. Titanu a jeho slitiny bývá využíváno na součástky motorů, draků i přístrojů. U motoru se používá na disky, rotory, prstence a skříně kompresorů, dále pak na rotační i stacionární kompresorové lopatky, na písty, ojnice, sčerací i distanční kroužky, převodové a turbínové skříně, šrouby, matice, pružiny, armatury a trubková vedení. Při stavbě draků se používá na potahy, křídla, ocasní plochy, zakrytování motoru i kabiny, dále na palivové nádrže, zásobníky, ohnivzdorné přepážky, kryty výfukových trubek, různé podpěry, ramena a výztuhy a také na spojovací elementy, jako jsou zejména nýty, šrouby a matice [27]. Titanu a jeho slitin se používá také na kované vrtulové listy, různé přístroje, zařízení na vrhání bomb apod. U vrtulníků se používají slitiny titanu na součásti motoru, trupu, potahu a na náběžné hrany vrtulových listů. V raketovém průmyslu se titan uplatňuje na pláště raket, kroužky, přívěsné části, palivové nádrže, raketové motory a voštiny. Titanové slitiny jsou ideální na výrobu tlakových nádob, které mají sloužit za velmi nízkých provozních teplot (-192 °C), kde jsou i vysokolegované oceli křehké. Ve všech případech byla potvrzena výtečná spolehlivost součástí vyrobených z titanu a jeho slitin. Jako příklad lze uvést skutečnost, že lopatky z titanových slitin, které byly v USA zabudovány do kompresorů, vydržely bez poruchy přes 1 milion letových hodin. Proto je možné konstatovat, že i v budoucnu zůstane titan jedním z mnoha materiálů používaných v konstrukci letadel či raket a že se letecký průmysl v budoucnu neobejde bez titanu a titanových slitin [15]. V následujících podkapitolách bude o jednotlivých částech leteckých konstrukcí pojednáno podrobněji.

5.4 Drak letadla

Jedním z hlavních důvodů použití titanových slitin na konstrukci trupu letadla je úspora hmotnosti a jeho příznivá tržná délka. Díky těmto vlastnostem je náhrada vysokopevnostních ocelí za titan výhodnější i přes to, že oceli vykazují lepší pevnost, stejně tak jako náhrada za slitiny na bázi hliníku, i když mají menší hustotu. To vedlo k nárůstu používání titanových slitin v trupech letadel v období posledních čtyřiceti let. Tento nárůst je nejlépe znázorněn na Obr. 13, který vykresluje stabilní růst používání titanu v trupu komerčních letadel *Boeing* od jeho zavedení v padesátých letech 20. století. V současnosti se procentuální podíl hmotnosti titanu v konstrukci *Boeingu 777* pohybuje okolo 9 %. Podobné hodnoty se vyskytují i u konkurenční společnosti *Airbus* [7]. V následujících odstavcích budou jednotlivé aplikace slitin titanu na drak letadla popsány podrobněji.



Obr. 13 Vývoj hmotnostního podílu titanových slitin u trupu letadel společnosti Boeing [7]

Slitiny titanu se u trupů letadel používají zejména k zastavení růstu únavových trhlin. Jsou zde aplikovány jako tenké, úzké prstence, umístěné kolem hliníkového trupu letadla jako pomyslný „břišní pás“, jejichž hlavním úkolem je zabránit právě rychlému šíření trhlin ve vnějším plášti letadla. V současnosti se titanových slitin používá také pro výrobu hydraulického potrubí moderních strojů, kde lze oproti použití oceli ušetřit až 40 % hmotnosti. K tomuto účelu se využívá zejména slitina typu $\alpha+\beta$ TiAl3V2,5, jež je snadno deformovatelná a vykazuje dostatečnou pevnost. Tam, kde je vyžadována vysoká odolnost proti korozi (zejména podlahy kuchyňských prostor a toalet), bývá využíváno komerčně čistého titanu CP-Ti. Nelegovaného titanu se využívá také pro potrubní systémy odmrazovacího zařízení, neboť zde je více než vysoká pevnost důležitá příznivá tepelná stabilita. Jelikož zde teploty běžně překračují teplotu 200 °C, hliníkových slitin již nelze použít. Navzdory vyšším počátečním nákladům se z kovaných slitin titanu vyrábějí i hlavní součástky podvozku letadla. Počáteční náklady jsou vyváženy po dlouhodobém používání, neboť součástky vyrobené z vysokopevnostních ocelí je nutno alespoň jednou za dobu životnosti letadla vyměnit díky jejich velké náchylnosti ke korozi. Tomuto lze zabránit právě použitím slitin titanu, čehož využila společnost Boeing a učinila z používání těchto slitin trend. Podvozek jejich letadel je téměř úplně vyroben ze slitiny TIMETAL 10-2-3 (TiV10Fe2Al3), což téměř zdvojnásobilo množství použitého titanu na modulu letadla *Boeing 777*. Úspora hmotnosti při použití této slitiny byla přibližně 270 kg na letadlo [7].

Díky potenciálně velkým zatížením, například při nárazu ptactva, bývají rámy oken kokpitu vyrobeny z kovaných titanových slitin, zatímco slitiny na bázi hliníku vykazují dostatečnou pevnost pro použití na ostatní okenní rámy. Dále jsou titanové slitiny preferovány jako podpory pro vertikální a horizontální stabilizéry ocasu z polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny, neboť mezi koeficientem tepelné roztažnosti titanu a kompozitu polymerní matrice je jen malá odchylka, na rozdíl od hliníku. Zároveň jsou slitiny titanu s uhlíkovými vlákny více chemicky kompatibilní než hliník a zabraňuje se tak problémům s galvanickou korozí.

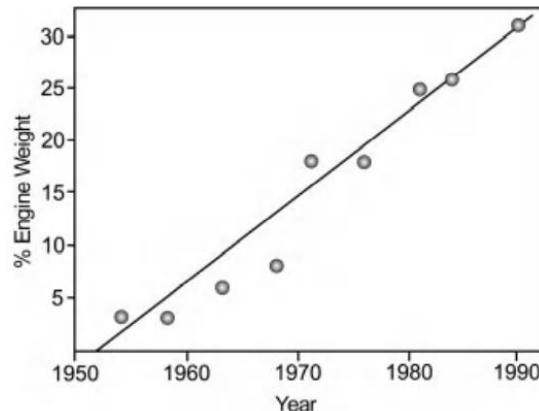
Ve srovnání s trhem komerčních letadel je využití slitin titanu u vojenských stíhacích letadel podstatně vyšší. To je dáno zejména tím, že vojenská letadla bývají navrhována v reakci na větší mechanické zatížení a na větší provozní teploty, což je spojeno s daleko větší manévrovatelností a nadzvukovou rychlostí vojenských letadel. Podíl titanových slitin na složení trupu těchto strojů může překračovat 50 %, u letadla *SR-71 „Blackbird“* to bylo dokonce 95 %. Titanové slitiny bývají používány zejména kvůli aero kinetickému zahřívání povrchové vrstvy letadla, neboť ani teplotní vlastnosti nejpokročilejších slitin hliníku byly pro příliš vysoké teploty nedostačující. V současnosti tvoří titan průměrně 35 až 50 % hmotnosti moderního stíhacího letounu, nejvíce v prostorech motoru, kde teploty překračují teplotní schopnosti hliníku. Novější slitiny typu $TiAl_6Zr_2Sn_2Mo_2Cr_2Si_{0,25}$ jsou používány na drak stíhacích letounů *F-22* a na letadla amerického výzkumného programu *Joint Strike Fighter*. Díky vynikajícím teplotním vlastnostem se používá v přepážkách motorových prostor těchto letadel, kde bývají teploty trupu vůbec nejvyšší. Mnohem větší využití nalézá titan ve vojenských letadlech také proto, neboť výkonnostní požadavky jsou zde daleko vyšší než u civilních dopravních letadel, kde je hlavním měřítkem pro výběr materiálů celková finanční efektivita. Největší a pravděpodobně nejpozoruhodnější titanová struktura vojenského letadla je křídlová skříň stíhacího letounu *F-22 Raptor* (Obr. 14), která snáší zatížení celkového nákladu křídel. S délkou 4,9 m, výškou 1,8 m a šířkou 0,2 m jde o jeden z největších titanových výkovek, jaký kdy byl vyroben. Přestože konečný kus váží pouze 150 kg, původní ingot, ze kterého byla skříň vyrobena, vážil 3000 kg. Tento příklad jasně dokazuje extrémně velké ztráty při obrábění (95 %) titanových výkovek, a který dává příležitost pro optimalizaci tohoto procesu do budoucna [7].



Obr. 14 Výkovek křídlové skříňe stíhacího letounu *F-22 Raptor* [28]

5.5 Plynové turbíny (motory)

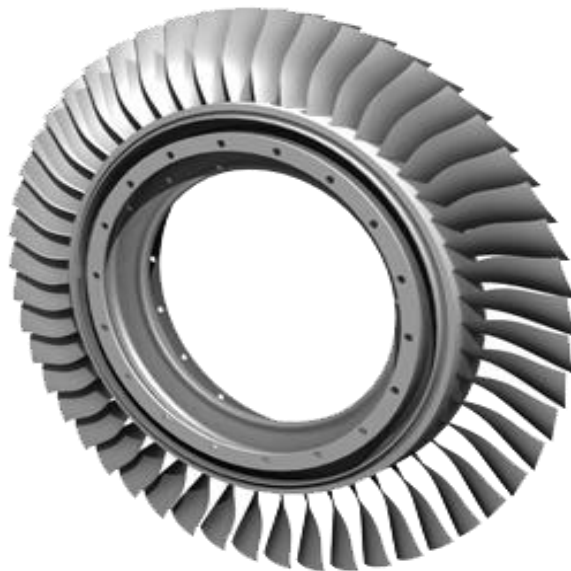
Hlavní oblastí pro využití titanových slitin v letectví jsou plynové turbíny. Přibližně jedna třetina konstrukční hmotnosti plynových turbín je tvořena z titanu, jelikož titan je vedle superslitin na bázi niklu typickým materiálem pro výrobu motorů. Slitiny titanu obsahovaly již první proudové motory, představené na počátku 50. let minulého století, jejichž výrobci tehdy byly společnosti Pratt & Whitney ve Spojených státech a Rolls-Royce v Anglii. Od těchto dob se obsah titanu v motorech neustále zvyšoval, jak znázorňuje Obr. 15 na příkladu motorů společnosti Rolls-Royce.



Obr. 15 Obsah titanu v motorech společnosti Rolls-Royce v průběhu let [7]

Vůbec první součástí motoru vyrobenou z titanu byly lopatky kompresoru, které zanedlouho následovaly kompresorové disky. V současnosti jsou ze slitin titanu vyrobeny také velké přední lopatky ventilátorů moderních proudových motorů. Délky těchto lopatek běžně překračují délky jednoho metru. Při těchto rozměrech může být rozklepání lopatek ventilátoru velkým problémem, neboť špičky těchto lopatek mohou překonat rychlost zvuku a způsobovat tak vznik smíšených nadzvukových a podzvukových tokových polí, což může generovat přidružené rázové vlny. Aby se tomuto jevu předešlo, zvýšila se celková tuhost lopatek přidáním krytů a tlumičů do jejich středu. Ačkoli tyto kryty byly schopny ovládat vibrace, nepříznivě ovlivnily aerodynamickou účinnost ventilátoru a zvýšily spotřebu paliva. Až díky pokročilým konstrukcím ventilátorů bylo možné zvýšit tuhost lopatek i bez krytování (díky rozšíření jednotlivých listů) a zároveň se podařilo snížit počet lopatek o třetinu. Konstrukce těchto ventilátorů jsou nyní využívány v nejmodernějších proudových motorech. Hlavní výrobci nejnovějších proudových motorů volili pro výrobu odlehčených lopatek ventilátorů různé cesty. Společnost General Electric použila pro výrobu jejich modelu GE90 vlákny vyztužené polymerní kompozity. Aby však byly splněny požadavky na odolnost proti erozi, přední hrany čepelí byly navrženy z titanu. Věrné titanu zůstaly nadále společnosti Rolls-Royce a Pratt & Whitney. Aby snížily hmotnost jejich motorů, přešly tyto společnosti na technologii dutých titanových lopatek pro své ventilátory. Prvotní návrhy těchto lopatek se skládaly z obrobených titanových čelních plechů, které byly v kapalně fází difuzně spojeny s titanovým voštinovým jádrem. Pokrok ve výrobní technice nyní umožňuje výrobu čepelí z titanových plechů pomocí superplastického tváření. Motory novějších letadel typu Airbus A380 od společností Rolls-Royce a GE/Pratt & Whitney Engine Alliance mají průměr ventilátorů přibližně 3 metry a obsahují právě duté titanové lopatky [7].

Evoluce v konstruování motorů si vyžadovala další snižování hmotnosti lopatek a disků kompresorů při současném zvyšování životnosti těchto součástí. Toho bylo možno dosáhnout tím, že disk a čepele byly metalurgicky spojeny v jedinou součást, tzv. blisk (Obr. 16). Kromě snížení hmotnosti tato konstrukce také eliminovala kritické místo pro vznik únavových trhlin, a to díky absenci rozhraní mezi diskem a lopatkami. Tato technologie je nyní standardem u kompresorů malých a středních velikostí komerčních a vojenských motorů. Jelikož se lopatky a disky ventilátorů používají pro provoz při relativně nízkých teplotách, bývají obvykle vyrobeny ze slitiny TiAl6V4. Horní teplotní hranice pro tuto slitinu typu $\alpha+\beta$ dosahuje 315 °C. Nicméně, ve vysokotlakém kompresoru při práci za vyšších teplot se používají spíše slitiny typu α , jejichž horní teplotní limit dosahuje 540 °C. Tato horní hranice není vymezena jejich odolností vůči vysokým teplotám a vůči creepovému tečení, nicméně jejich odolností vůči oxidaci, zejména v porovnání se slitinami na bázi niklu. Při dlouhodobému vystavení vysokým teplotám totiž u těchto typů slitin často dochází k drastickému snížení tažnosti a únavové pevnosti [7].



Obr. 16 Titanový „blisk“ pro kompresor turbíny letadla [29]

U rotačních součástí může být tento teplotní limit pro slitiny titanu ještě nižší, díky jejich náchylnosti k hoření. To bývá způsobeno tím, že mezi rotující čepelí a stěnou skříně dochází ke tření a tím pádem dochází k lokálnímu ohřevu na špičce nože. To vede za zvýšených teplot a vysokém tlaku vzduchu vést k velmi prudké oxidaci titanu. Právě k těmto okolním podmínkám dochází ve vysokotlakém kompresoru motoru. Aby se předešlo tomuto problému, vyvinula společnost Pratt & Whitney vysoce stabilní slitinu TiV35Cr15, která je vůči hoření odolná. Tato slitina našla své uplatnění v motoru stíhacího letadla F-22, kde se vyskytovala ve statorech kompresoru a tryskách [7].

5.6 Kosmonautika

Úspora hmotnosti samozřejmě hraje roli také v kosmonautice. Z tohoto důvodu byly slitiny titanu používány v prvních programech vesmírných letů Apollo a Mercury. Standardně bývají tyto slitiny používány pro palivové nádrže na pohon satelitů. Vlastnosti, jako nízká hmotnost, vysoká pevnost a dlouhodobá chemická kompatibilita s palivem, staví titan do lepší pozice než vysokopevnostní oceli. Požadavek na extrémně lehkou konstrukci satelitních komponent však vyžaduje použití velmi pokročilé výrobní techniky optimalizující hmotnost součástí. Tloušťka stěny palivových nádrží, vyrobená z kovaných poloskořepin, dosahuje u běžně používaných satelitních pohonných systémů tloušťky od 1 do 25 mm. Příliš složité obrábění se dá zjednodušit superplastickým tvářením. 6 až 10 mm silný titanový plech lze superplasticky tvarovat na hemisféry, jež se později spojují v nádrž buď difuzí nebo svařováním. Příklad této nádrže je na Obr. 17. Oproti konvenčním způsobům výroby, tedy kování a obráběním, je dosaženo značných úspor ve výrobních nákladech. Kromě superplastického tváření jistou úsporu poskytují také β slitiny tvářitelné za studena. Tento přístup zvolila společnost MAN Technologies AG pro výrobu palivových nádrží jejich autonomní kosmické lodi *Automated Transfer Vehicle* (ATV) určenou k zásobování mezinárodní vesmírné stanice (ISS). Poloskořepinové stěny nádrží jsou vyrobeny ze slitiny TiV15Cr3Al3Sn3 speciálním patentovaným procesem válcování za studena nazvaným *counter-role spin forming*, zjednodušeně rotační tváření. Ve srovnání se zmíněným superplastickým tvářením se jedná o podstatně levnější proces. Slitina navíc vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti. Technologii rotačního tváření byla použita také na výrobu palivových nádrží horní části rakety *Ariane 5*. Další slitina TiAl3V2,5 se používá pro nízkoteplotní aplikace, jelikož vykazuje dobrou tažnost i houževnatost i za kryogenních teplot. Byla využívána zejména pro výrobu vysokotlakého potrubí systémů na čerpání vodíku v raketoplánech NASA [7].



Obr. 17 Titanová palivová nádrž [30]

5.7 Helikoptéry

U vrtulníků se slitiny titanu používají na jejich nejvíce namáhanou součást, tedy rotorovou hlavu. Hlava rotoru ze slitiny TiAl6V4 používaná pro vrtulníky *Eurocopter BO 105* a *BK 117* je znázorněna na Obr. 18. V nedávné době však probíhal intenzivní výzkum pro náhradu této slitiny vysoce pevnými slitinami typu β . Tato náhrada byla nejprve uskutečněna u rotorové hlavy vrtulníku *Westland Super Lynx*, kde zmíněnou slitinu nahradila slitina TiV10Fe2Al3. V současnosti se již slitiny β využívají stále častěji. Konkrétně ze slitiny TiV10Fe2Al3 jsou vyrobeny rotory helikoptér jako *RAH-66 Comanche* a *V-22 Osprey* [7].



Obr. 18: Rotorová hlava vrtulníku MBB BK 117 [31]

5.8 Spojovací materiály a pružiny

Vysokopevnostní spojovací prvky z titanových slitin se vyrábějí v mnoha velikostech a tvarech. Pevnost ve smyku těchto spojovacích materiálů se pohybuje od 620 do 830 MPa, pevnost v tahu od 965 do 1380 MPa, v závislosti na výběru slitiny a typu tepelného zpracování. Jelikož hlavním problémem spojovacích prvků bývá jejich utržení, což si vyžaduje opětovnou montáž, největší pozornost se tak věnuje správným povrchovým úpravám, mazání a vhodným konstrukcím závitů. Tyto faktory jsou pro návrh spojovacích materiálů klíčové. Příklad spojovacího prvku vyrobeného z titanu lze vidět na Obr. 19.

Vysokopevnostní slitiny titanu, jako např. TiV13Cr11Al3 a TiAl3V8Cr6Zr4Mo4 se osvědčily pro použití na výrobu pružin pro zavírání dveří komerčních i vojenských letadel. Mezi jejich hlavní přednosti patří vysoká pevnost v kombinaci s nízkým modulem pružnosti. Slitiny typu β se také používají na výrobu nýtů. V závislosti na požadavcích se pro tyto nýty používají objímky vyrobené z titanu, hliníku a oceli. K prevenci vůči vzniku opotřebení používá různých povlaků [9].



Obr. 19: Spojovací materiál vyroben z titanu [32]

5.9 Lockheed SR-71 „Blackbird“

Prvního května roku 1960 bylo výzvědné letadlo *Lockheed U-2*, s pilotem amerického letectva Francisem Gary Powersem na palubě, sestřeleno sovětskými raketami země-vzduch. Letadlo bylo zasaženo ve výšce 21 kilometrů, přičemž po jedenácti kilometrovém pádu se pilotovi konečně podařilo katapultovat se. Studená válka začala eskalovat. Ve společnosti Lockheed tehdy začaly práce na výzkumu nového letadla pro sběr informací z nepřátelského území, které by létalo rychleji než kterýkoli stroj před ním a zároveň bylo co nejvíce nenápadné pro radarová zařízení. Prezident Eisenhower si hluboce cenil strategických výhod vzdušného průzkumu letadla *U-2*, které Spojeným státům v napjaté době poskytovalo značné výhody. Nicméně pověřil společnost Lockheed nemožným úkolem – postavit letadlo, které není možné sestřelit a postavit ho rychle.

Kelly Johnson, jeden z předních leteckých konstruktérů dvacátého století, dokázal se svým týmem dodávat „nemožné“ strategicky důležité technologie v neuvěřitelně krátkých termínech již dříve. Příkladem byl právě letoun *U-2*. Jeho tým byl známý svým neutuchajícím pocitem povinnosti ke své vlasti, svou kreativitou tváří v tvář technologickým výzvám a nesmírnou vytrvalostí. Nový projekt pro ně však byl ve všech ohledech něčím úplně jiným. Jak sám Johnson poznamenal: „všechno muselo být vynalezeno.“ Na nový projekt dostal pouhých dvacet měsíců. Rychlost letadla měla překračovat $3200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jiná letadla v tehdejších dobách byla schopna této rychlosti dosáhnout, avšak jen v krátkých intervalech. Nový letoun musel být schopen tuto rychlost udržovat po několik hodin. Při tak vysoké rychlosti by byl drak letadla vyroben z konvenčních materiálů vlivem třetí s teplotou atmosféry roztaven. Jelikož tato teplota dosahovala $540 \text{ }^\circ\text{C}$, čekala konstruktéry celá řada zdánlivě nepřekonatelných konstrukčních a materiálových výzev. Jedinou možností pro výrobu draku letadla byly slitiny titanu, které zajišťovaly pevnost nerezových ocelí, relativně nízkou hmotnost a odolnost proti vysokým teplotám. Titan se však pro výrobu letadla ukázal jako obzvláště citlivý materiál. Křehká slitina se při nesprávném zacházení roztříštila, což vyvolalo velké frustrace na montážních linkách a nová školení pro strojníky společnosti Lockheed. Konvenční ocelové nástroje pokovené kadmíem nevyhovovaly práci s titanem, musely být proto vyměněny za nástroje nové, vyrobené právě z titanu. Celkový podíl titanu na hmotnosti letadla nakonec činil neuvěřitelných 95 %. Další problém s teplotou způsobovalo tření na náběžných hranách letadla. Zatímco na náběžných hranách vznikalo neuvěřitelné teplo, okolní teplota mimo okna kokpitu dosahovala mrazivých $-50 \text{ }^\circ\text{C}$. Ben Rich ze společnosti *Skunk Works* strávil řešením problému rozptýlení tepla po celém draku letadla obrovské množství hodin. Problém vyřešil poměrně jednoduše. Jelikož černá barva vyzařuje a absorbuje teplo, letadlo bylo celé namalováno černě. Tak také získalo svůj název „Blackbird“, neboli kos. Původní *Blackbird* byl označen jako *A-12* a uskutečnil svůj první let 30. dubna 1962. Z jednomístného *A-12* se brzy stal větší *SR-71*, do kterého bylo přidáno druhé sedadlo pro operátora průzkumných systémů a zároveň byl schopen nést více paliva než *A-12*. První let *SR-71* proběhl 22. prosince 1964.

Zmenšení velikosti radarového obrazu letadla snížilo pravděpodobnost, že letadlo bude zpozorováno a sestřeleno. Ačkoli byly počáteční výsledky testů velmi dobré, zvěsti o schopnostech sovětských radarů vedly americkou vládu k požadavku na ještě menší radarový profil letadla. Bylo nutné přepracovat povrchy tak, aby se zabránilo odrazům radarových

signálů, čímž se dosáhlo přemístěním motorů doprostřed křídel a do barvy byl přidán prvek absorbující radarové signály. Výslednému testování byl podroben model letadla v plném měřítku na tajném místě v nevadské poušti. Výsledky byly ohromující. Model o délce více než 30 metrů se na sovětském radaru objevil jako objekt o velikosti mezi ptákem a člověkem. Vývojářskému týmu se podařilo snížit radarový průřez letadla o 90 %.

Blackbird byl poprvé povolán do akce 27. října 1962, kdy byl na vrcholu Karibské krize sestřelen americký pilot Rudolph Anderson při průzkumné misi s letounem *U-2* nad Kubou. Nové letadlo překonávalo rekordy téměř pokaždé když vzlétlo. 20. července 1963 dosáhlo trvalé rychlosti Mach 3 v letové výšce 23 kilometrů. *Blackbird* také naprosto změnil pravidla navigace. Dálnice, řeky a metropolitní oblasti se již jeví jako zastaralé a začalo se orientovat podle pohoří, pobřežních čar a velkých vodních ploch. Při tak obrovské rychlosti a letové výšce neměly ani ty nejlepší systémy protivzdušné obrany šanci *Blackbird* sestřelit. Při útoku protiletadlových zbraní viděl pilot pouze blikající červené výstražné světlo, avšak to byla jediná věc, které se musel obávat. Rakety explodovaly mnoho kilometrů od cíle. Rekordů bylo ustaveno mnoho. *Blackbird* dodnes zůstává nejrychlejším pilotovaným letadlem světa. Při svém posledním letu před odchodem do penze uletělo letadlo vzdálenost Los Angeles – Washington za 67 minut. Co je však vůbec nejdůležitější, letadlo naprosto splnilo svá strategická očekávání a po více než dvě desetiletí sloužilo Spojeným státům jako spolehlivý stroj pro průzkumné mise. Jen málo lidí si je vědomo toho, jak důležitou roli hrál *SR-71 Blackbird* (Obr. 20) během studené války. Odkaz tohoto titanového zázraku bude jistě obdivován po mnoho nadcházejících generací [33].



Obr. 20: Lockheed SR-71 „Blackbird“ [34]

6 Diskuse: budoucnost titanu a jeho slitin v letectví

Technologie výroby titanu by měla v budoucnosti směřovat své úsilí k co nejnižším nákladům na výrobu konečných komponent pro výrobce letadel. Jelikož se nároky výrobců na finanční stránku výroby stále stupňují, bude pro titan stále náročnější udržet si svůj významný podíl ve struktuře leteckých strojů. Pro titan se nabízejí dva přístupy, jak těmto požadavkům vyhovět. Jednak vyvinutím levnějších slitin pro výrobu leteckých komponent a také optimalizací výrobních procesů, čímž by se finální cena významně snížila. Nicméně, letečtí inženýři jsou si velmi dobře vědomi velkých výhod, které titan nabízí a lze předpokládat, že tomu tak bude i nadále. Potenciální zákazníci tak musí být v prvé řadě uvědomeni, jakými vynikajícími vlastnostmi titan disponuje, o snaze technologů zlevnit proces výroby a o potenciální výhodné životnosti komponent při nových aplikacích titanu [35].

V současnosti se předpokládá, že největší nárůst použití v letectví zaznamenají slitiny typu β . Hlavním důvodem je zlepšení celkového výkonu, a zároveň i jisté ekonomické výhody, které použití těchto slitin nabídne. Příkladem může být náhrada titanového plechu ze slitiny TiAl6V4 za titanový pás vyrobeného ze slitiny TiV15Cr3Al3Sn3, který nabízí lepší vlastnosti, nižší výrobní náklady a je celkově snadněji vyrobitelný [36].

Budoucnost titanu na globálním leteckém trhu vypadá podle nejnovějších predikcí slibně. Stále se nabízejí nové příležitosti v komerčních i vojenských letadlech, vrtulnících a ve všeobecném i regionálním letectví. Odhaduje se, že hodnota trhu s titanem v letectví a kosmonautice dosáhne v roce 2030 hodnoty 5,4 miliardy amerických dolarů s roční mírou růstu 3,6 %. Hlavními hybateli tohoto nárůstu má být rostoucí poptávka po nových letadlech a po lehkých titanových materiálech. Mezi rozvíjející se trendy patří vývoj technologií ke snižování výrobních nákladů a stále větší využívání titanu v letadlech. Tato předpověď vychází z průzkumu tržního podílu titanu v globálním leteckém průmyslu a prognózy tohoto podílu do roku 2023, který je segmentován podle typu letadel, typu slitin, jejich aplikací a podle regionu. Průzkumu se zúčastnily společnosti jako VSMPO-AVISMA, Berkshire Hathaway Incorporated, Allegheny Technologies Incorporated, Alcoa, Baoji Titanium Industry a Kobelco Group. Dále se předpovídá, že v budoucnu nalezne titan největší využití opět v letectví, zejména v bezpečnostních pásech sedadel, částech trupu, rámech dveří, nosnících křídel atd. Hlavními důvody má být tolikrát zmiňovaná úspora hmotnosti a snížení spotřeby paliva. Tyto aspekty mají vést ke většímu počtu používaných slitin titanu ze strany konstruktérů v blízké budoucnosti. V rámci využití titanu v globálním leteckém průmyslu má zůstat hlavním segmentem komerční letectví, které má zajistit největší nárůst v používání titanových slitin v různých typech letadel, neboť právě v tomto odvětví je poptávka po nových letadlech největší a obsahuje mnoho možností, kde se slitiny titanu mohou uplatnit. Co se týče regionů, největší nárůst využití slitin titanu v letectví se očekává v Severní Americe, protože právě zde byla vždy největší poptávka po letadlech a lehkých kovech [37].

7 Závěr

Tématem této bakalářské práce bylo sepsat výstižný a kategoricky členěný přehled o materiálech na bázi titanu a jejich využití v letecké technice. Titan jako lehký kov se již od začátku jeho průmyslové výroby v 50. letech 20. století jevil jako vhodný kandidát pro letecké aplikace. V zemské kůře je díky minerálům ilmenit a rutil poměrně hojně zastoupený a nevýhody jako komplikované procesy jeho výroby a vysokou cenu zcela vyvažují jeho výjimečné vlastnosti. Vysoký poměr pevnosti ku hmotnosti, skvělá odolnost proti korozi, dobrá tepelná stabilita, to jen výčet vlastností, které může titan nabídnout a jež ho činí ideálním kovem pro využití v leteckém průmyslu.

Nejčastěji je však titan využíván ve formě slitin, které bývají nejčastěji rozděleny dle struktury v rovnovážném stavu. Okruh slitin typu α není příliš početný, nicméně tyto slitiny patří mezi nejvýznamnější. Díky jejich dobré tažnosti a odolnosti proti tečení se hojně vykytují v leteckých motorech, zejména nejznámější slitina této skupiny TiAl5Sn2,5. Naopak velké množství slitin obsahuje skupina $\alpha+\beta$. Základní výhodou těchto slitin je jejich velká pevnost za normálních teplot a dobrá tváritelnost za studena. Za vyšších teplot však mají poměrně malou pevnost. Pro výrobce letadel je tato skupina slitin nejprůzračnější, jelikož jejich vlastnosti jako dobrá lomová houževnatost, kujnost, pevnost v tahu a odolnost proti únavovému poškození jsou pro letecké komponenty klíčové. Z této skupiny nejvíce vyčnívá slitina TiAl6V4. Poslední skupinou jsou slitiny typu β . Jejich vlastnosti jako mimořádná odolnost proti únavě a vysoká pevnost v tahu je předurčily pro využití u vysoce zatížených konstrukčních dílů, zejména v draku letadel. Nejznámějšími zástupci této skupiny jsou slitiny TiAl3Mo8Cr11 a TiAl3V13Cr11.

Co se týče využití titanu a jeho slitin v letectví, mezi největší konkurenty titanu se řadí hliník, nikl, železo a polymery vyztužené uhlíkovými vlákny. Mezi hlavní kritéria ovlivňující výběr materiálu pro letecké aplikace patří hmotnost, spotřeba paliva, výrobní náklady, životnost, spolehlivost a bezpečnost. Díky svým vlastnostem bývá titan uplatňován v oblastech, kde je kombinace hmotnosti, pevnosti, odolnosti proti korozi a velké teplotní stability klíčová a kterou nejsou konkurenční materiály schopny tak dobře zajistit. Titan a jeho slitiny tak bývají využívány pro celou řadu leteckých komponent. Mezi hlavní oblasti použití patří drak letadel a plynové turbíny. Také se však dají nalézt v kosmonautice (palivové nádre), u helikoptér (hlava rotoru) a jako spojovací materiály a pružiny letadel.

V blízké budoucnosti by se pak měli výrobci titanu snažit o co největší snížení nákladů na výrobu leteckých komponent, a to buď vyvinutím levnějších slitin nebo optimalizací výrobních procesů. Finanční náklady totiž hrají při výběru leteckých materiálů obrovskou roli. Díky svým výjimečným vlastnostem si však titan své důležité postavení v leteckém průmyslu pravděpodobně udrží. Kvůli snížení hmotnosti a spotřeby paliva se dá očekávat budoucí aplikace titanových slitin (zejména typu β) na celou řadu leteckých komponent, hlavně v oblasti trupu. Titan a jeho slitiny mají z hlediska materiálového inženýrství obrovský potenciál. Mohou nejen usnadňovat každodenní život, snižovat ekonomické náklady v různých odvětvích průmyslu, ale také mohou posunovat dosavadní možnosti techniky na vyšší úroveň. Z hlediska letectví pak mají určitě ještě co nabídnout.

8 Literatura

- [1] FROES, F. H., D. EYLON a H. B. BOMBERGER. *Titanium technology: present status and future trends*. Dayton, Ohio: Titanium Development Association, 1985. ISBN 9780935297003.
- [2] ABKOWITZ, S. *The Emergence of the Titanium Industry and the Development of the Ti-6Al-4V Alloy: Collections and Recollections*. Jom Monograph Series, 1999. ISBN 978-0873394338.
- [3] Titanium Statistics and Information. *U.S. Geological Survey* [online]. U.S. Department of the Interior [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/titanium-statistics-and-information>
- [4] IMAM, M. A., F. H. FROES a K. L. HOUSLEY. *Titanium and Titanium Alloys*. John Wiley, 2010. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1002/0471238961.2009200119050107.a01.pub3>
- [5] BAUCCIO, M.L. Bauccio. *ASM Metals Reference Book*. 3rd Edition. ASM International, 1993. ISBN 978-0-87170-478-8.
- [6] KING, Hobart. M. Heavy Mineral Sand. In: *Geology.com* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://geology.com/minerals/rutile.shtml>
- [7] LEYENS, C. a M. PETERS, ed. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2003. ISBN 3-527-30534-3.
- [8] KUTTOLAMADOM, M., J. JONES, L. MEARS, T. KURFESS a A. CHORAGUDI. *Investigation of the Machining of Titanium Components for Lightweight Vehicles*. SAE 2010 World Congress & Exhibition: Clemson Univ., 2010. ISSN 0148-7191.
- [9] FROES, F. H., ed. *Titanium: Physical Metallurgy, Processing and Applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2015. ISBN 978-1-62708-079-8.
- [10] KING, H. M. Rutilated Quartz. In: *Geology.com* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://geology.com/minerals/rutile.shtml>
- [11] KING, H. M. Ilmenite. In: *Geology.com* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://geology.com/minerals/ilmenite.shtml>
- [12] Titanium: chemical element. *Britannica.com* [online]. Encyclopædia Britannica, 2007 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/titanium>
- [13] SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: STNL – Nakladatelství technické literatury, 1979.

- [14] *Periodická tabulka: Titan* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
- [15] SEDLÁČEK, V. *Titan a jeho slitiny: Výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- [16] SINGH, P., H. PUNGOTRA a N. S. KALSI. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. *Materials Today: Proceedings*. 2017, 8971-8982. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.249>
- [17] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [18] Titanium: Titanium 5Al-2.5Sn ELI. *Alloys International, Inc.* [online]. 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://alloysintl.com/titanium/titanium_5al-2-5sn_eli/
- [19] YURI, T., Y. ONO a T. OGATA. *Science and Technology of Advanced Materials: Effects of surface roughness and notch on fatigue properties for Ti-5Al-2.5Sn ELI alloy at cryogenic temperatures* [online]., 291-299 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1468699603000585>
- [20] Ti-5Al-2.5Sn Alloy. *AZO Materials* [online]. 2013 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9297>
- [21] STEFANESCU, Doru M. a Roxana RUXANDA. *ASM Handbook vol. 9 – Metallography and Microstructures: Solidification Structure of Titanium Alloys*. University of Alabama: ASM International, 2004.
- [22] RAHMAN RASHID, R.A., M.J. BERMINGHAM, S. SUN, G. WANG a M.S. DARGUSCH. The response of the high strength Ti-10V-2Fe-3Al beta titanium alloy to laser assisted cutting. *Precision Engineering*. 2013, **37**(2), 461-472. ISSN 01416359. Dostupné z: doi: 10.1016/j.precisioneng.2012.12.002
- [23] BOYER, R. R. *An overview on the use of titanium in the aerospace industry: Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. Elsevier B.V., 1996. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- [24] *Modern Metals: The magazine for metal service centers, fabricators & OEMs/end users*. Concast metal products Co., 1962, 76 s.
- [25] MOURITZ, Adrian P. *Introduction to aerospace materials*. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead publishing in materials. ISBN 978-185-5739-468.
- [26] COYNE, J.E. a W.H. SHARP. *Metal progress*. 3rd editon. 1960, s. 60.
- [27] ALLSOP, R. T. *Light metals: Titanium fasteners in aircraft*. 22. 1959, s. 201-204.

- [28] BOYER, Rodney R. *Titanium and Its Alloys: Metallurgy, Heat Treatment and Alloy Characteristics*. Encyclopedia of Aerospace Engineering. The Boeing Company, Seattle, WA, USA: John Wiley, 2010, 11 s. ISBN 978-0-470-68665-2. Source: J. Rossow, Wyman Gordon.
- [29] Blisk. In: *Technicut: Technology in cutting* [online]. Sheffield, UK, 2015 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.technicut.co.uk/blisk>
- [30] 58 litre hydrazine bladder tank. Model BT 01-0. In: *Space Propulsion: Ariane Group* [online]. Robert-Koch-Str. 1, 82024 Taufkirchen, Germany, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.space-propulsion.com/spacecraft-propulsion/hydrazine-tanks/index.html#104>
- [31] MCCLELLAN, J. Mac. In: *Redback Aviation* [online]. Hoppers Crossing, Victoria 3029, Australia, 1990 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.redbackaviation.com/rigid-rotorhead-mbb-bk-117-helicopter/>
- [32] Ti-Matic Blind Bolt. In: *Howmet Aerospace* [online]. 3724 E. Columbia Street, Tucson, AZ 85714, Arizona, UNITED STATES, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.howmet.com/global/en/products/product.asp?bus_id=1&cg_id=88&cat_id=659&prod_id=4637
- [33] Creating the Blackbird. *Lockheedmartin.com* [online]. Bethesda, Maryland, USA [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/history/blackbird.html>
- [34] MIZOKAMI, K. SR-71 Blackbird. *Popularmechanics.com* [online]. New York City, New York, USA: Hearst, 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a27962424/sr-71-blackbird/>
- [35] HENRIQUES, Vinicius A. R. Titanium production for aerospace applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2009, Jan. - Jun. 2009(V. 1, n. 1), 11.
- [36] BOYER, R.R. a R.D. BRIGGS. The use of β titanium alloys in the aerospace industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005, 01 December 2005(14.), 9.
- [37] TYRRELL, M. Titanium used in aerospace expected to reach \$5.4 billion by 2030. *Aerospace Manufacturing* [online]. 2018, 9 AUGUST 2018, 1 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/titanium-used-in-aerospace-expected-to-reach-5-4-billion-by-2030/>

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

| | |
|----------------------|---|
| α | – fáze alfa |
| Al | – hliník |
| ATV | – Automated Transfer Vehicle |
| β | – fáze beta |
| bcc | – body-centered-cubic (kubická fáze prostorově centrovaná) |
| C | – uhlík |
| CaTiO ₃ | – perovskit |
| CaTiSiO ₅ | – titanit |
| Cl | – chlor |
| CO | – oxid uhelnatý |
| CO ₂ | – oxid uhličitý |
| CP | – commercially pure (komerčně čistý) |
| Cr | – chrom |
| CFRP | – Carbon-fiber-reinforced polymer (polymer vyztužený uhlíkovými vlákny) |
| EU | – European Union (Evropská unie) |
| Fe | – železo |
| FeTiO ₃ | – metatitaničitan železnatý |
| H | – vodík |
| hcp | – hexagonal-close-packing (hexagonální fáze) |
| Hf | – hafnium |
| ISS | – International Space Station (Mezinárodní vesmírná stanice) |
| Mg | – hořčík |
| MgCl ₂ | – chlorid hořečnatý |
| Mn | – mangan |
| MnTiO ₃ | – pyrofanit |
| Mo | – molybden |
| N | – dusík |
| Ni | – nikl |
| Nb | – niob |
| O | – kyslík |
| Si | – křemík |
| Sn | – cín |
| Ta | – tantal |
| Ti | – titan |
| TIMET | – Titanium Metals Corporation |
| TiCl ₄ | – chlorid titaničitý |
| TiO ₂ | – oxid titaničitý |
| USA | – United States of America (Spojené státy Americké) |
| V | – vanad |
| Zr | – zirkonium |

Symbols

| | | |
|----------------|---------------------------------------|----------------------------|
| E | [J] | – energie |
| E | [Pa] | – modul pružnosti v tahu |
| G | [Pa] | – modul pružnosti ve smyku |
| HB | [Pa] | – tvrdost podle Brinella |
| HV | [Pa] | – tvrdost podle Vickerse |
| l | [m] | – délka |
| m | [kg] | – hmotnost |
| Ma | [-] | – Machovo číslo |
| R _e | [Pa] | – mez kluzu |
| R _m | [Pa] | – mez pevnosti v tahu |
| t | [s] | – čas |
| t | [°C] | – teplota |
| λ | [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | – tepelná vodivost |
| ρ | [kg·m ⁻³] | – hustota |

10 Seznam obrázků

- Obr. 1: Černý písek, obsahující drobné části ilmenitu, rutilu a zirkonu
- Obr. 2: Rutil
- Obr. 3: Ilmenit
- Obr. 4: Rozšířený Krollův proces pro výrobu titanové houby
- Obr. 5: Závislost dodávek letadel na produkci titanové houby
- Obr. 6: Porovnání atomového poloměru titanu s potenciálními legujícími prvky
- Obr. 7: Polymorfní chování titanu, fázová přeměna v závislosti na teplotě
- Obr. 8: Mikrofotografie struktury slitiny TiAl5Sn2,5
- Obr. 9: Mikrofotografie struktury slitiny TiAl6V4
- Obr. 10: Mikrofotografie struktury slitiny TiV10Fe2Al3
- Obr. 11: Základní faktory a vlastnosti pro výběr materiálu vhodného k návrhu letadla
- Obr. 12: Procentuální hmotnostní podíl plastů tvrzených hliníkovými vlákny a slitin oceli, hliníku a titanu na konstrukční hmotnosti trupu a motoru moderních dopravních letadel
- Obr. 13: Vývoj hmotnostního podílu titanových slitin u trupu letadel společnosti Boeing
- Obr. 14: Výkovek křídlové skříně stíhacího letounu F-22 Raptor
- Obr. 15: Obsah titanu v motorech společnosti Rolls-Royce v průběhu let
- Obr. 16: Titanový „blisk“ pro kompresor turbíny letadla
- Obr. 17: Titanová palivová nádrž
- Obr. 18: Rotorová hlava vrtulníku MBB BK 117
- Obr. 19: Spojovací materiál vyroben z titanu
- Obr. 20: Lockheed SR-71 „Blackbird“

11 Seznam příloh

- Tabulka 1: Vybrané vlastnosti titanu
- Tabulka 2: Příklad složení slitin α
- Tabulka 3: Chemické složení slitiny TiAl5Sn2,5
- Tabulka 4: Vybrané vlastnosti slitiny TiAl5Sn2,5
- Tabulka 5: Složení dvoufázových slitin $\alpha+\beta$
- Tabulka 6: Chemické složení slitiny TiAl6V4
- Tabulka 7: Vybrané vlastnosti slitiny TiAl6V4
- Tabulka 8: Složení jednofázových slitin β
- Tabulka 9: Chemické složení slitiny TiV10Fe2Al3
- Tabulka 10: Vybrané vlastnosti slitiny TiV10Fe2Al3
- Tabulka 11: Světová poptávka po titanu a jeho využití v různých odvětvích průmyslu
- Tabulka 12: Vlastnosti materiálu a jejich důležitost pro letecké komponenty